

A relevância da inteligência artificial no Direito Penal: O uso da Lógica Fuzzy no incremento do controle social formal na gestão pública dos resíduos industriais

The relevance of artificial intelligence in Criminal Law: The use of Fuzzy Logic to increase formal social control in the public management of industrial waste

La relevancia de la inteligencia artificial en el Derecho Penal: El uso de la Lógica Difusa para aumentar el control social formal en la gestión pública de los residuos industriales

Recebido: 03/01/2024 | Revisado: 09/01/2024 | Aceitado: 10/01/2024 | Publicado: 12/01/2024

Eliana Sgarbi de Carvalho Potascheff

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1333-8425>

Universidade Estácio de Sá, Brasil

E-mail: eliana.potascheff@gmail.com

Mauro Cesar Cantarino Gil

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7398-2417>

Universidade Estácio de Sá, Brasil

E-mail: maurocgil@gmail.com

Resumo

A destinação inadequada de resíduos industriais gera riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas, podendo desencadear danos ambientais materiais e imateriais significativos, muitos deles sem possibilidades de reversão. Com base na Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020, o Poder Público estabelece o controle do transporte e destinação de resíduos mediante o envio de formulários por parte dos geradores e dos destinatários desses materiais aos órgãos de controle ambiental. O uso da inteligência artificial (IA) pode, nessa perspectiva, ser avaliado como uma ferramenta a ser utilizada na otimização da gestão dessas informações por parte da administração pública, ao buscar identificar cenários de alerta que possam configurar, em algum momento, um crime ambiental. Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a real contribuição da utilização de aplicações da inteligência artificial, por parte dos órgãos ambientais, no sentido de melhorar o controle da movimentação e da destinação dos resíduos industriais. A abordagem metodológica utilizada foi o levantamento bibliográfico e a pesquisa legislativa. Como resultado, demonstrou-se a significância do uso da inteligência artificial pelos órgãos ambientais no intuito de reforçar o controle social formal do Estado, a fim de evitar os crimes ambientais decorrentes de situações inapropriadas envolvendo a movimentação e a destinação de resíduos industriais.

Palavras-chave: Meio ambiente; Crime ambiental; Resíduos industriais; Inteligência artificial.

Abstract

The improper disposal of industrial waste generates risks of soil and groundwater contamination, which can trigger significant material and immaterial environmental damage, many of which cannot be reversed. Based on Ordinance No. 280, of June 29, 2020, the Government establishes the control of the transportation and disposal of waste by sending forms by generators and recipients of these materials to environmental control agencies. The use of artificial intelligence (AI) can, from this perspective, be evaluated as a tool to be used in optimizing the management of this information by the public administration, when seeking to identify alert scenarios that may configure, at some point, an environmental crime. This research aims to evaluate the real contribution of the use of artificial intelligence applications, by environmental agencies, to improve the control of the movement and disposal of industrial waste. The methodological approach used was the bibliographic survey and the legislative research. As a result, the significance of the use of artificial intelligence by environmental agencies to reinforce the formal social control of the State was demonstrated, in order to prevent environmental crimes resulting from inappropriate situations involving the movement and disposal of industrial waste.

Keywords: Environment; Environmental crime; Industrial waste; Artificial intelligence.

Resumen

La eliminación inadecuada de los residuos industriales genera riesgos de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, que pueden desencadenar importantes daños ambientales materiales e inmateriales, muchos de los cuales no pueden revertirse. Con base en la Ordenanza N° 280, del 29 de junio de 2020, el Gobierno establece el control del transporte y disposición de los residuos mediante el envío de formularios por parte de los generadores y destinatarios de estos materiales a los organismos de control ambiental. El uso de la inteligencia artificial (IA) puede, desde esta perspectiva, ser evaluado como una herramienta a utilizar en la optimización de la gestión de esta información por parte

de la administración pública, a la hora de buscar identificar escenarios de alerta que puedan configurar, en algún momento, un delito ambiental. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la contribución real del uso de aplicaciones de inteligencia artificial, por parte de las agencias ambientales, con el fin de mejorar el control del movimiento y disposición de residuos industriales. El enfoque metodológico utilizado fue el relevamiento bibliográfico y la investigación legislativa. Como resultado, se demostró la importancia del uso de la inteligencia artificial por parte de los organismos ambientales para reforzar el control social formal del Estado, con el fin de prevenir los delitos ambientales derivados de situaciones inadecuadas que involucran el movimiento y disposición de residuos industriales. **Palabras clave:** Medio ambiente; Delitos contra el medio ambiente; Residuo industrial; Inteligencia artificial.

1. Introdução

Com frequência, o Estado e os sistemas sociais deparam-se com acidentes ambientais e outras não conformidades que configuram crimes ambientais, provocando efeitos deletérios ao meio ambiente. Nesse contexto, uma parcela substancial das ocorrências advém do gerenciamento e da destinação inapropriados dos resíduos industriais, podendo incorrer na contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, entre outros danos, muitos dos quais irreversíveis.

Paralelamente, o Estado, na figura dos órgãos ambientais, busca adotar medidas preventivas que evitem os crimes ambientais. Nessa perspectiva, a administração pública atende ao disposto na Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020, que regulamenta o funcionamento do Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos – SINIR. Tais medidas constituem, então, um sistema de normas jurídicas afeitas à preservação do meio ambiente, bem como uma forma de controle social formal do Estado específica para as questões relacionadas à gestão de resíduos.

Grosso modo, o SINIR integra as informações dos geradores de resíduos elegíveis à elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, objeto da Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010).

Com base no referido diploma legal, cabe ao órgão de controle ambiental exigir informações dos geradores e dos destinadores de resíduos, de maneira a acompanhar, por exemplo, a quantidade de resíduos movimentados e sua destinação final. O referido monitoramento abarca as informações recebidas pelo preenchimento dos formulários eletrônicos do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) – preenchido pelo gerador dos resíduos, e do Cadastro de Destinação Final de Resíduos (CDF), emitido pelo destinador dos resíduos.

A partir desse cenário, o objeto do presente estudo consiste em verificar a real utilidade do uso de ferramentas de inteligência artificial (IA) no âmbito das ações de controle social formal do Estado, com a finalidade de coibir o crime ambiental que decorre da gestão inadequada dos resíduos sólidos industriais. Nesse sentido, foi avaliada a aplicabilidade do uso da Lógica Fuzzy para monitorar as informações no preenchimento dos formulários eletrônicos, a fim de identificar eventuais cenários de alerta. Dessa forma, é possível ao órgão ambiental atuar de forma preventiva, no sentido de evitar o dano ambiental e o crime ambiental a ele associado.

Nessa concepção, a pesquisa foi elaborada com base em levantamento bibliográfico e em pesquisa legislativa, que propiciaram as reflexões contidas neste artigo.

A abordagem do tema tem início com a exposição acerca da constitucionalização da proteção meio ambiente, que emergiu alinhada à evolução da visão da sociedade contemporânea para essa temática.

Na sequência, foram apresentados a definição de crime ambiental, assim como os mais relevantes princípios na esfera do Direito Penal Ambiental. Ainda nesse campo, destacou-se o marco regulatório da Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1998) e de sua significância ao dispor sobre a responsabilização penal da pessoa jurídica.

Feito isso, tratou-se de contextualizar os resíduos sólidos industriais e os crimes ambientais associados à sua gestão inadequada, tal como as medidas implementadas pelo Estado visando ao controle social formal dessas ocorrências. Nesse campo, sobressai o destaque à Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020, bem como a dinâmica de emissão e de controle dos formulários eletrônicos de preenchimento obrigatório por parte dos geradores e dos destinadores de resíduos sólidos.

Com base na situação atual, o estudo então debruça-se sobre a análise da real utilidade das ferramentas de inteligência artificial na otimização do monitoramento dos geradores e dos destinadores de resíduos sólidos industriais, analisando então a validade do emprego dessas técnicas na gestão de dados digitais do Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos.

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a real contribuição da utilização de aplicações da inteligência artificial, por parte dos órgãos ambientais, no sentido de melhorar o controle da movimentação e da destinação dos resíduos industriais.

2. Metodologia

Para a elaboração deste trabalho, a abordagem metodológica utilizada foi a pesquisa qualitativa, em que a atuação do pesquisador foi o instrumento fundamental para a condução do estudo, realizado mediante a coleta de múltiplas formas de dados (Creswell, 2010). Foi empregado o método indutivo que busca, a partir de dados particulares suficientemente constatados, inferir uma verdade geral (Gil, 2016).

Quanto à finalidade, trata-se de uma pesquisa exploratória, uma vez que se desenvolve em torno de um tema do estudo ainda pouco explorado, e que constitui a primeira etapa de uma discussão mais ampla e abrangente (Gil, 2016). Os meios usados neste estudo foram a pesquisa bibliográfica e documental, com especial enfoque à análise legislativa e doutrinária relacionada ao tema (Vergara, 2014).

3. Resultados e Discussão

3.1 A tutela constitucional do meio ambiente

Cotidianamente, a questão ambiental ocupa maiores espaços nas preocupações da sociedade e na agenda dos segmentos mais esclarecidos. A crescente ocorrência de inúmeros e diversos problemas ambientais atesta claramente que a questão ambiental é uma pauta atual, presente na ciência e na tecnologia, na economia, na cultura e na política (Milaré, 2020).

O planeta atravessa uma severa crise ambiental, que se acentua a cada dia que passa. Nesse contexto, a atuação inconsequente do homem na utilização dos finitos bens naturais em prol de seu bem-estar, contribui para o desequilíbrio e a galopante destruição dos ecossistemas (Antunes, 2016).

A degradação ambiental de origem antrópica iniciou-se no Século XVIII, com o advento da Revolução Industrial (Silva, 2016). Contudo, a real tomada de consciência com a preservação do meio ambiente no mundo emergiu de forma relativamente recente, na segunda metade do Século XX (Milaré, 2020).

Em setembro de 1962, a publicação da obra *Silent Spring*, um *best seller* de autoria da cientista Rachel Carson, polarizou a atenção da sociedade da época ao denunciar o desaparecimento de pássaros nos campos americanos, em decorrência da utilização do inseticida dicloro difenilcloroetano, conhecido comercialmente como DDT. A imensa repercussão pública da obra suscitou, como consequência, a proibição do uso do DDT nos EUA e em outros países (Carson, 2010).

Uma década após, em 1972, o mundo se voltou para a questão da preservação ambiental com a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo. O evento, considerado como a primeira manifestação expressiva em nível mundial da preocupação com o controle e a proteção do meio ambiente, ressaltou a soberania de cada nação quanto à melhor forma de atuação nessa seara, desde que não afetasse os países vizinhos. A Declaração de Estocolmo, derivada da conferência, materializou a orientação global para a preservação ambiental (Gusmão, 2009).

Outros movimentos voltados à proteção do meio ambiente se sucederam ao longo das décadas de 1970 e 1980, produzindo mudanças culturais e políticas em todo o mundo e motivando os governos a cuidarem dos ecossistemas, como forma de garantir a disponibilidade dos recursos ambientais imprescindíveis (Silva et al., 2019).

Nesse cenário, a questão ambiental manifesta-se no terreno político-econômico e na própria concepção de vida do homem no mundo. Portanto, cabe a toda política ambiental buscar o equilíbrio e a harmonia entre as necessidades de industrialização e de desenvolvimento com as demandas de proteção e de restauração do ambiente (Prieur, 1984).

No campo do ordenamento jurídico brasileiro, a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, constitui um marco, ao introduzir a temática ambiental no âmbito das políticas públicas brasileiras. Dela derivou a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), visando a atender a uma exigência mundial pela implementação de políticas direcionadas à proteção do meio ambiente, com o objetivo de possibilitar o planejamento, o controle e a gestão dos recursos naturais (Passos, 2009).

Observa-se que o objeto precípua da Política Nacional do Meio Ambiente foi a qualidade de vida ambiental das presentes e das vindouras gerações (Sirvinskas, 2018). Ressalta-se, no art.9º, a sua maior aspiração na esfera ambiental, ao elencar 13 instrumentos com a finalidade de implantar a política ambiental do Brasil. Entre eles, destacam-se o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental, a avaliação de impactos ambientais, bem como o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, entre outros (Brasil, 1981).

O texto da Constituição Federal de 1988 emerge de uma dimensão primária antropológica – centrada na proteção do ser humano – permitindo seu desenvolvimento digno e apropriado, em pleno equilíbrio com o entorno que lhe cerca. Trata-se, pois, de uma perspectiva totalmente alinhada com os valores consagrados na própria Constituição e com a ideia de Estado Social de Direito (constitucionalismo existencial) (Prado, 2019).

Na sequência, a Constituição de 1988 catapultou a proteção plena do meio ambiente ao patamar de valor central da Nação, recebendo, pois, a alcunha de “Constituição Verde”. Ao contrário dos textos constitucionais precedentes, que apenas trataram da matéria em disposições pontuais, o Texto Supremo adotou uma concepção sistêmica, no qual disciplinou o meio ambiente como princípio das ordens econômica e social (Milaré, 2020).

O art. 225, *caput*, da Constituição Federal de 1988, consagrou a valorização da temática ambiental que se iniciou com a Lei nº 6.938/1981, na medida em que reconheceu o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, como direito fundamental da pessoa humana (Marchesan et al., 2008).

Nesse diapasão, o traçado estabelecido pelo texto constitucional brasileiro converge com a reivindicação da concepção de uma nova ordem jurídica, possuidora de mecanismos delimitativos do uso de recursos naturais, de maneira racional, visando ao “meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida” (art.225, *caput*, CF) (Brasil, 1988).

Em uma abordagem que busca a melhoria da qualidade de vida e de bem-estar social, o texto constitucional consagra como *direito fundamental* o direito ao meio ambiente equilibrado, imprescindível à vida e ao desenvolvimento do ser humano, valorizando, de forma precisa, a condição humana digna e a qualidade de vida como dados ínsitos ao seu desenvolvimento como pessoa (Prado, 2019).

Destarte, o art. 225 desponta intrinsecamente vinculado ao rol axiológico basilar enumerado na Constituição, de forma que atesta uma sólida correlação entre esse dispositivo e, por exemplo, os valores da dignidade e da liberdade, da igualdade e da justiça (Preâmbulo, arts. 1º e 5º, CF) (Brasil, 1988).

À vista disso, a relação definida entre esse preceito constitucional e o conceito de bem-estar jurídico-penal ambiental é direta e manifesta (art. 225, § 3º, CF). Transcrevendo *ipsis litteris*: “As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados” (Brasil, 1988). Consequentemente, o ambiente torna-se bem jurídico constitucional, com referência explícita de tutela penal (Prado, 2019).

Na medida em que não se pode tratar da qualidade de vida humana dissociada de uma adequada conservação do ambiente, é possível entender que a própria existência da espécie humana demanda essa proteção. Nesse sentido, a ambiente

converte-se em um bem jurídico de natureza metaindividual ou macrossocial, de caráter difuso, voltado ao coletivo ou social, com sujeitos indeterminados e cuja lesão possui natureza extensiva ou disseminada (Sgubbi, 1975).

3.2 A criminalização das agressões ao meio ambiente

Conceitualmente, o crime é definido como um ato que provoca a violação de um bem que é protegido no âmbito da legislação penal. Nessa perspectiva, tal instituto deriva de uma conduta, comissiva ou omissiva, sem a qual o delito não se sucede. Em resposta à prática dessa conduta delitativa deve existir uma reação contrária àquele que realizou a conduta punível – o sujeito ativo – com a finalidade de reparar o mal causado e de reprimir outras ocorrências danosas (Silva, 2021).

Assim, a plena compreensão da sistemática do arcabouço jurídico penal relacionado ao meio ambiente depende do entendimento do que se configura como crime. Com base na Lei de Introdução ao Código Penal (Brasil, 1941):

Art 1º. Considera-se crime a infração penal a que a lei comina pena de reclusão ou de detenção, quer isoladamente, quer alternativa ou cumulativamente com a pena de multa; contravenção, a infração penal a que a lei comina isoladamente pena de prisão simples ou de multa, ou ambas as alternativas ou cumulativamente.

Na esfera do direito criminal, é de suma importância analisar qual será o bem jurídico tutelado, isto é, qual fato está sendo protegido pela norma. Via de regra, esse ramo do direito atua, como *ultima ratio*, com a finalidade de realizar a tutela somente dos valores fundamentais, zelando pelas condutas ambientais apenas quando os outros ramos do direito, por si só, não conseguem fazê-lo. Portanto, a agressão ambiental, em muitos casos, irá atingir as esferas penal, administrativa e civil, seja alternativamente ou mesmo cumulativamente (Silva, 2021).

O arcabouço jurídico do Direito Penal do Ambiente deve ser construído, principalmente, por meio da integração de seus preceitos ao Código Penal ou em leis especiais, isto é, em uma Lei Penal ou em outras espécies normativas, gerais ou setoriais, direcionadas à proteção do ambiente (Prado, 2019).

No âmbito da prática jurídica, os princípios gerais do Direito representam articulações teóricas com a finalidade de solucionar os problemas que decorrem da insuficiência do modelo exegético-conceitual, atuando como “pautas orientadoras da normação jurídica” (Larenz, 1938). Em se tratando do campo criminal, dois princípios norteadores assumem destaque: o princípio da intervenção mínima e o princípio da fragmentabilidade (Santos & Rosendo, 2019).

O princípio da intervenção mínima, na alçada do direito penal, estabelece que esse ramo do direito só deve atuar quando os demais ramos do direito não forem suficientes à repressão da conduta, buscando a defesa dos bens jurídicos essenciais à coexistência dos homens, não sendo esses capazes de serem tutelados a contento de forma menos gravosa (Prado, 1999).

O princípio da fragmentabilidade – que decorre do princípio da intervenção mínima - direciona-se ao próprio bem jurídico, cabendo a sua defesa no campo penal frente a determinadas formas de agressão, tidas como socialmente inadmissíveis. Com base nisso, o direito penal somente deve tratar de ofensas verdadeiramente graves aos bens jurídicos tutelados (Prado, 2005).

A noção de bem jurídico encontra-se intrinsecamente associada à realização de um juízo de valor concernente a um determinado objeto ou situação social e à sua respectiva importância para o desenvolvimento do homem, sendo esses valores fundamentados no texto constitucional (Prado, 1992).

Tendo a Constituição Federal de 1988 estabelecido o meio ambiente como valor social em seu art. 225, a Lei nº 9.605/1998 prossegue nessa linha ao estipular a ciência jurídica penal como tutora de infrações designadas como crime. Por conseguinte, entende-se a grande significância que a proteção do meio ambiente representa para a sociedade (Santos; Rosendo, 2019).

Estabelecendo um marco decisivo no direito ambiental brasileiro, foi publicada, em 13.02.1998, a Lei de Crimes Ambientais (Lei 9.605/1998), consolidando duas importantes missões: efetivar o ideário constitucional de apenar condutas lesivas ao meio ambiente e de acolher as recomendações expressas na Carta da Terra e na Agenda 21, aprovadas na Conferência do Rio de Janeiro. Apesar da nomenclatura, o referido diploma legal é um instrumento normativo de caráter híbrido, ao abarcar também as infrações de ordem administrativa (Milaré, 2020).

À época de sua promulgação, esse diploma legal foi considerado bastante inovador, não se remetendo somente às sanções penais, mas abrangendo também as sanções administrativas:

O quarto marco é representado pela edição da Lei 9.605, de 12.02.1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Dita lei, conhecida como “Lei dos Crimes ambientais”, representa significativo avanço na tutela do ambiente, por inaugurar uma sistematização das sanções administrativas e por tipificar organicamente os crimes ecológicos. O diploma também inova ao tornar realidade a promessa constitucional de se incluir a pessoa jurídica como sujeito ativo do crime ambiental superando o clássico *principio societas delinquere non potest* (Milaré, 2020, p. 243)

Ao adotar o sistema híbrido em sua composição, a Lei de Crimes Ambientais corrobora a proteção tripartite preunciado na Constituição Federal:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

(...)

§ 3º As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados. (Brasil, 1998)

Dividida em oito capítulos e possuidora de oitenta e dois artigos, a referida lei, ainda que criticada por muitos, busca tentar sistematizar as infrações penais e administrativas em um só diploma, imbuída da humildade de se saber carente de uma norma regulamentadora (Silva, 2021).

Caracterizada pela sua natureza híbrida, a Lei de Crimes Ambientais aglutina conteúdos díspares – penal, administrativo e internacional – e almeja dar um tratamento uniforme à matéria ambiental, na medida em que dispõe sobre todos os elementos que constituem o meio ambiente (Prado, 2019).

Destacando seu amplo espectro, esse diploma legal organiza espaços específicos aos crimes contra a flora, contra a fauna, contra a poluição, contra o ordenamento urbano e o patrimônio cultural e contra a administração ambiental (Costa Neto, 2003).

Não obstante seu cunho inovador, cabe ressaltar alguns aspectos críticos no texto legal da referida Lei de Crimes Ambientais. De pronto, destaca-se o seu caráter fortemente ao designar à categoria de delito um elevado número de comportamentos que, em princípio, não deveriam passar de meras infrações administrativas ou, no máximo, de contravenções penais, o que evidencia sua total desarmonia com os princípios penais da intervenção mínima e da fragmentariedade, entre outros (Prado, 2019).

Nessa senda ressalta-se também a utilização, por parte do legislador, de conceitos amplos e indeterminados, por muitas vezes repletos de impropriedades técnicas, linguísticas e lógicas. Em tal contexto nota-se, ainda, a norma penal em branco, aquela em que a descrição da conduta punível se apresenta incompleta ou lacunosa, demandando complementação de outro dispositivo legal (Prado, 2019).

Ao demonstrar-se problemática no que tange aos tipos penais, a Lei de Crimes Ambientais enseja discussões em torno da punição de situações concretas da ocorrência de delitos ambientais que verdadeiramente não constituem lesão ao bem jurídico

protegido do tipo penal. Dada a essa circunstância, com frequência as decisões judiciais recorrem ao princípio da insignificância (Silva, 2008).

Formulado por Claus Roxin (1997), o princípio da insignificância aponta para a manifestação contrária ao uso imoderado da sanção criminal, considerando atípicas as ações ou omissões que afetem, de maneira ínfima, o bem-jurídico penal.

No campo da proteção do meio ambiente e de suas peculiaridades, é essencial ratificar que a orientação político-criminal mais adequada deve buscar a intervenção penal de forma reservada e cautelosa, norteadas pelos ditames dos rígidos princípios constitucionais penais – como a intervenção mínima e a fragmentariedade – pilares esses do Estado de Direito Democrático (Prado, 2003).

3.3 A responsabilidade penal da pessoa jurídica

Na alçada da Lei de Crimes Ambientais emerge uma temática por demais controvertida e que concentra a atenção da doutrina penal em todo o planeta (Prado, 2019), a qual se desenvolve em torno dos principais sistemas de responsabilidade penal da pessoa jurídica descritas nesse diploma legal:

Art. 2º Quem, de qualquer forma, concorre para a prática dos crimes previstos nesta Lei, incide nas penas a estes cominadas, na medida da sua culpabilidade, bem como o diretor, o administrador, o membro de conselho e de órgão técnico, o auditor, o gerente, o preposto ou mandatário de pessoa jurídica, que, sabendo da conduta criminosa de outrem, deixar de impedir a sua prática, quando podia agir para evitá-la. (Brasil, 1998)

Com base nessa perspectiva, observa-se a responsabilização das pessoas físicas no que tange à eventual prática dos crimes elencados nessa legislação, mesmo que decorram de conduta omissiva. O caráter inovador do texto destaca-se, contudo, por conta da possibilidade da responsabilização da pessoa jurídica devido à prática de crimes ambientais. O terceiro artigo da referida lei debruça-se, pois, sobre a responsabilidade das pessoas jurídicas, abarcando os âmbitos administrativo, civil e criminal (Santos; Rosendo, 2019).

A responsabilidade penal das pessoas jurídicas foi inicialmente abordada no Brasil pela Constituição Federal de 1988, §3º do art. 225: “As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados” (Brasil, 1988).

Partindo dessa referência constitucional, verifica-se que a Lei nº 9.605/1998 acolheu, com sucesso, a responsabilidade penal da pessoa jurídica, ratificando o compromisso da percepção da atuação das empresas no mundo contemporâneo frente ao seu papel ativo na prática, que abrange as atividades poluidoras, o desmatamento intensivo e a pesca predatória em níveis significativos (Machado, 2016).

Todavia, cabe ressaltar que, em termos científicos, o Direito Penal brasileiro – a exemplo dos demais Direitos fundamentados nas bases romano-germânicas – defende a irresponsabilidade penal da pessoa jurídica, ao considerar que os crimes praticados no domínio da pessoa jurídica somente podem ser criminalmente imputados às pessoas naturais na qualidade de autores ou partícipes (Prado, 2019).

Tal prescrição deriva, em essência, de se encontrarem ausentes, na atividade da própria pessoa jurídica os elementos a seguir: a) capacidade de ação no sentido penal estrito; b) capacidade de culpabilidade (princípio da culpabilidade); c) capacidade de pena (princípio da personalidade da pena), imprescindíveis à caracterização da responsabilidade penal objetiva (Prado, 2019).

Em se tratando da aplicabilidade das penas, percebe-se que as penas direcionadas às pessoas físicas diferem daquelas endereçadas às pessoas jurídicas (Santos; Rosendo, 2019). Nessa senda, o Código Penal (Brasil, 1941) estabelece que as penas cabíveis ao sistema jurídico penal são: privativas de liberdade, restritivas de direito e multa. Na seara da Lei nº 9.605/1998, destinam-se às pessoas físicas as penas privativas de liberdade, restritivas de direito e multa. Por sua vez, às pessoas jurídicas são aplicáveis penas restritivas de direito, prestação de serviços à comunidade e multa.

3.4 Resíduos sólidos industriais, poluição e crimes ambientais

O aumento na industrialização associado à urbanização provocou consequências importantes ao planeta, como o aumento na demanda de energia, o crescimento do volume nos resíduos sólidos gerados, além de outros efeitos ao meio ambiente (Prajapati, 2021). Assim, projeta-se que a geração de resíduos no mundo irá representar o dobro da população, atingindo a marca de 3,4 bilhões de toneladas ao ano até 2050 (The World Bank, 2022). Na atualidade, o gerenciamento de resíduos sólidos constitui a maior dificuldade enfrentada por um considerável número de países (Chand Malav, 2020).

Conceitualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), define resíduos sólidos aqueles em estado sólido e semissólido, provenientes de atividades doméstica, industrial, de serviços, de varrição, comercial, agrícola e hospitalar. Nesse grupo incluem-se, ainda, os lodos gerados nos processos de tratamento de água, assim como os que provêm de equipamentos e instalações de controle de poluição, uma vez que são possuidores de características que tornam inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou nos corpos de água (Barros, 2012).

Grosso modo, os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua periculosidade e à sua origem (Barros, 2012). Com base na norma ABNT 10004/2004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem receber a seguinte classificação no que se refere à sua periculosidade:

Resíduos Classe I – Perigosos

Possuem periculosidade, que se apresenta por riscos potenciais à saúde pública e/ou meio ambiente ou ainda uma das características a saber: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade – definidas no corpo da referida norma. O enquadramento de um resíduo como perigoso também irá ocorrer caso sua tipologia esteja descrita nos anexos A ou B da norma ABNT 10004/2004. (ABNT, 2004)

Resíduos Classe II – Não perigosos

São assim designados quando atendem à codificação estabelecida no anexo H da norma ABNT 10004/2004. Os resíduos não perigosos recebem a subclassificação em resíduos classe II A – não inertes e em resíduos classe II B – inertes, com base em sua afinidade com a descrição contida na norma para cada um dos subgrupos (ABNT, 2004).

Os resíduos perigosos demandam especial atenção, na medida em que podem ser nocivos, no presente e no futuro, à saúde dos seres humanos, dos demais organismos e ao meio ambiente (Braga, 2005).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, promulgada mediante a Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) e regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.004/2010 (Brasil, 2010) também estabelece a definição de resíduo sólido, em seu art. 3º, Inciso XVI. Com base nessa definição, resíduos sólidos são quaisquer materiais, substâncias, objetos ou bens descartados originários de atividades antrópicas em sociedade, o que abrange os resíduos em estado sólido ou semissólido, assim como os gases contidos em recipientes, além dos líquidos cujas características já foram descritas na ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004).

Quanto à sua origem, a Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) classifica os resíduos sólidos em diferentes grupos, como resíduos em grupos distintos: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais, entre outros.

Os resíduos industriais originam-se dos processos produtivos e das instalações industriais, abrangendo uma significativa diversidade de indústrias e de processos produtivos, bem como resíduos não associados à atividade fim da indústria (Barros, 2012). A aquisição e armazenamento de matérias-primas, as operações de produção, a limpeza e a manutenção de equipamentos e líquidos provenientes do vazamento ou derramamento de produtos químicos ilustram com propriedade alguns dos mais relevantes resíduos industriais frequentemente gerados (Philippi Jr., 2005).

Entre outros efeitos deletérios, a disposição de resíduos industriais representa uma grave ameaça à qualidade das águas subterrâneas. Com frequência, resíduos perigosos, tóxicos e radioativos eram dispostos no subsolo sem qualquer controle. Locais como áreas de baixo valor econômico, como cavas de mineração, brejos e voçorocas foram utilizados para a disposição de resíduos sólidos (Calijuri & Cunha, 2013).

Usualmente, a poluição é definida como uma “alteração inde sejável nas características físicas, químicas e biológicas da atmosfera, litosfera ou hidrosfera que cause ou possa causar prejuízo à saúde, à sobrevivência, ou às atividades dos seres humanos e outras espécies, ou ainda deteriorar materiais” (Braga, 2005, p. 6). Utilizando uma abordagem prática e legal, tal conceito deve estar associado às intervenções antrópicas no ambiente (Braga, 2005).

O descarte inadequado dos resíduos industriais possui grande potencial poluidor, gerando contaminação ambiental e afetando a qualidade do solo, da água e do ar, na medida em que são compostos de toda sorte de materiais, como íons metálicos, orgânicos voláteis e tantas outras substâncias (Santos et al., 2022).

A Lei de Crimes Ambientais – Lei 9.605, de 1998 (Brasil, 1998) descreve o crime de poluição no art. 54, conforme segue:

Art. 54. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

Pena - reclusão, de um a quatro anos, e multa.

§ 1. Se o crime e culposo:

Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

§ 2. Se o crime:

I - tornar uma área, urbana ou rural, imprópria para a ocupação humana;

II - causar poluição atmosférica que provoque a retirada, ainda que momentânea, dos habitantes das áreas afetadas, ou que cause danos diretos a saúde da população;

III - causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade;

IV - dificultar ou impedir o uso público das praias;

V - ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos:

Pena - reclusão, de um a cinco anos.

§ 3. Incorre nas mesmas penas previstas no parágrafo anterior quem deixar de adotar, quando assim o exigir a autoridade competente, medidas de precaução em caso de risco de dano ambiental grave ou irreversível.

Cabe destacar que, nesse contexto, não se pune toda emissão de poluentes, mas apenas aquela absolutamente danosa ou perigosa para a saúde humana, ou ainda aquela que cause a matança de animais ou destruição – extermínio – importante da flora. Assim sendo, consideram-se poluentes somente as substâncias presentes em concentrações suficientes para produzir um efeito estimável sobre o homem, os animais, os vegetais ou os materiais (Prado, 2019).

Entre outras questões, a gestão inadequada de resíduos sólidos industriais pelo gerador pode ocasionar a constituição de passivo ambiental que, por definição, consiste em um conjunto de obrigações com gastos ambientais que recaem sobre a empresa em seu processo de produção, sendo essas relacionadas à prevenção, à redução ou à retificação de danos ambientais (Santos, 2001; Ribeiro, 2010).

3.5 A sociedade de risco e a atuação preventiva do Estado na repressão do crime ambiental

É notória a preocupação do Direito Ambiental com a efetiva implementação de suas normas, não se atendo somente à sua mera formalização. A real efetividade da atuação desse ramo do Direito é de ordem preventiva, visto que busca instrumentos e técnicas que se antecipem à degradação e impeçam que ela ocorra (Melhen & Zanini, 2020).

A denominada sociedade de risco, fenômeno social contemporâneo, teve início após a Segunda Guerra Mundial, como resultado do acelerado desenvolvimento das pesquisas tecnológicas e científicas (Lopez, 2010).

O conceito de sociedade de risco – criado na década de 1980 pelo sociólogo alemão Ulrich Beck – defende que a ciência e a tecnologia modernas deram origem a uma sociedade de risco, na qual o sucesso da produção da riqueza foi superado pela produção do risco. Nesse contexto, emergem novas formas pós-industriais de perigos e riscos, caracterizados pela alta complexidade e suas consequências. Tal cenário, sem precedentes históricos similares, ameaça não somente as instituições sociais, mas sobretudo as condições de vida no planeta (Beck, 2018).

Assim observam-se, na atualidade, duas espécies de riscos: os riscos concretos, ou industriais, derivados de uma formatação social da natureza industrial, e os riscos invisíveis ou abstratos, relacionados à sociedade de risco (ou pós-industrial).

Os riscos concretos ou industriais são considerados “riscos calculáveis” com base no conhecimento científico contemporâneo, de forma que sua existência e dimensões são plenamente conhecidas e avaliadas.

A esses riscos aplica-se, pois, o Princípio da Prevenção, que consiste em uma orientação principiológica dirigida à previsibilidade científica dos riscos decorrentes de uma formatação social maquinista-industrial (Carvalho, 2017).

Por sua vez, os riscos abstratos associados à forma pós-industrial da sociedade – entre os quais estão os riscos ambientais – são reconhecidos por sua (i) invisibilidade; (ii) globalidade; e (iii) transtemporalidade (Carvalho, 2017).

A invisibilidade ocorre na medida em que os riscos abstratos não se mostram perceptíveis aos sentidos humanos. Diferentemente dos riscos advindos da sociedade industrial, que possuem uma concretude causal típica da lógica da operacionalidade mecanicista da sociedade industrial, os riscos peculiares da era pós-industrial (ou de risco) são conhecidos por sua invisibilidade. Devido a essas especificidades e à insuficiência de conhecimento técnico-científico para determinar a sua previsibilidade, estes riscos são geridos pelo Princípio da Precaução (Carvalho, 2017).

A invocação do referido princípio ocorre quando a informação científica é insuficiente, inconclusiva ou incerta e existem indicações de possíveis efeitos de determinadas intervenções potencialmente perigosos e capazes de afetar o ambiente, a saúde das pessoas ou dos animais ou a proteção vegetal (Milaré, 2020).

3.6 O controle social do Estado na coerção do crime ambiental

O Direito Penal representa um relevante instrumento para a realização do intitulado controle social, atuando sem distinção de classes sociais, etnias ou gêneros e permitindo a construção de uma sociedade mais justa e igualitária (Salvino et al., 2022).

A eficácia do Direito Penal na qualidade de controle social pode ser assim descrita:

O Direito Penal é o segmento do ordenamento jurídico que detém a função de selecionar os comportamentos humanos mais graves e perniciosos à coletividade, capazes de colocar em risco valores fundamentais para a convivência social, e descrevê-los como infrações penais, combinando-lhes, em consequência, as respectivas sanções, além de estabelecer todas as regras complementares e gerais necessárias à sua correta e justa aplicação. (Capez, 2022)

No âmbito do Direito Penal, o controle social mantém o equilíbrio centralização-marginalização, usando, para isso, diversos recursos com os quais a sociedade delimita a conduta dos indivíduos. O sistema de controle social distingue-se entre o controle formal e o controle informal (Martinelli & Bem, 2023).

O controle social informal emerge nos núcleos primários (família), passando pela escola, pela profissão e culmina com a obtenção de uma atitude conformista, na medida em que o indivíduo internaliza modelos e pautas transmitidos. Trata-se de um controle sugestivo, que visa à adequação do comportamento individual ao padrão social (Martinelli & Bem, 2023).

Por outro lado, o controle social formal advém de um sistema de normas constituído de regras jurídicas e princípios gerais que lhe atribui validade e eficácia. Ou seja, é por meio de leis que o Estado administra o comportamento individual, estabelecendo sanções àqueles que descumprirem as normas vigentes (Martinelli & Bem, 2023).

Destarte, a repreensão realizada por meio da penalização de condutas danosas contribui, de maneira primordial, para a garantia da paz e da harmonia social (Salvino et al., 2022). A prevenção geral positiva expressa na sanção penal, imbuída de caráter preventivo, tem por objetivo chamar a atenção da sociedade acerca de sua vigência, alertando sobre as possíveis respostas caso a regra imposta seja contrariada (Ponte, 2022).

A definição de bem jurídico, na qualidade de objeto da tutela penal, está intrinsecamente associada à dignidade da pessoa humana. O meio ambiente, como bem difuso, possui relação direta com a existência do homem. Ao se almejar a sadia qualidade de vida – tal como descrito no art. 225 da Constituição Federal de 1988 – o meio ambiente constitui bem jurídico, o que confere legitimidade à intervenção penal no controle de condutas que o agridam ou atentem contra ele (Leite, 2021).

Nessa linha, cabe ao Direito Penal amparar-se por mecanismos de controle e de tutela alinhados com o contexto social vigente, ainda que em *ultima ratio*, ou seja, quando for insuficiente a cominação de uma sanção de natureza civil ou administrativa para a tutela do bem jurídico (Leite, 2021).

Ao Estado cabe, pois, atuar, por meio da função legislativa, executiva ou judiciária, não podendo falhar em seu dever de proteção aos mais relevantes bens jurídicos da sociedade, tampouco agir aquém da proteção mínima imposta pela Constituição Federal de 1988 (Bianchini et al., 2022).

De conformidade com o texto constitucional, a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998) – quando bem usada, trabalhada e respeitada – é capaz de defender e de preservar a contento os bens ambientais, na medida em que determina sanções penais e administrativas contra condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (Fiorillo, 2014).

No âmbito da gestão de resíduos sólidos, a implementação da Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituiu a regulamentação para o manejo de resíduos sólidos no Brasil. Nesse sentido, o setor público tornou-se o principal agente a atuar na regulamentação e na fiscalização das práticas do sistema de gestão de resíduos (Alves, 2021).

Tomando como base a Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010), art. 3º, Inciso X, o gerenciamento de resíduos sólidos abrange um conjunto de ações exercidas, de forma direta ou indireta, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos. Nessa definição está incluída a etapa da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, alinhada em conformidade com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com o plano de gerenciamento de resíduos sólidos, requeridos na referida lei (Barros, 2012).

Observa-se, no controle social positivado pela legislação que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o instituto promovedor dos intuitos legais, como opções para cobranças de fiscalização, bem como para a responsabilização pela redução na geração e no recolhimento de resíduos e na prática da logística reversa. Nessa senda, torna-se essencial a construção de um modelo de controle social, apto a acolher a formulação, a implementação e a fiscalização das ações que visem à efetividade da referida política (Querino & Heringer, 2019).

3.7 A Portaria nº 280/2020 e o Manifesto de Transporte de Resíduos

No que tange à legislação específica para resíduos sólidos, cabe destaque à Portaria do Ministério do Meio Ambiente nº 220, publicada no ano de 2020, e que “instituiu o Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR nacional, como ferramenta de

gestão e documento declaratório de implantação e operacionalização do plano de gerenciamento de resíduos”. O MTR nacional constitui uma ferramenta de uso por meio eletrônico que compõe o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR) (Brasil, 2020).

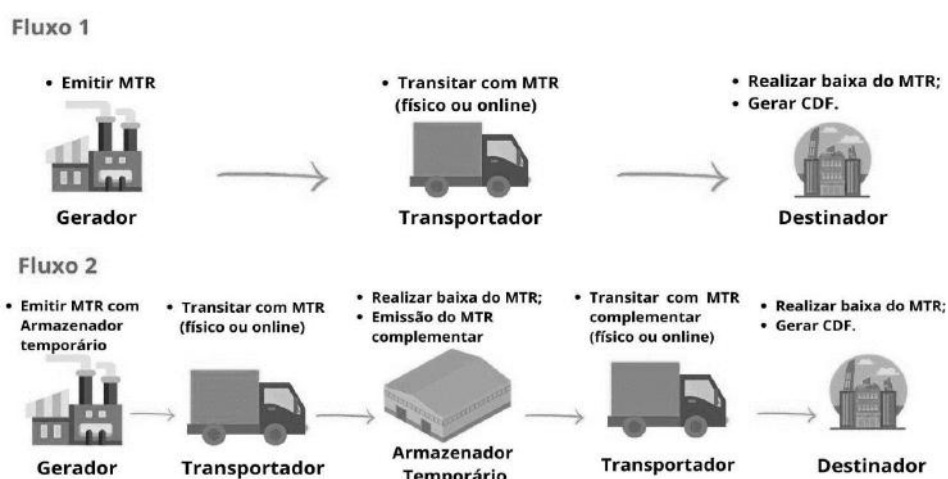
Consonante com a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei Federal nº 12.305/2010 e com a exigência de apresentação do Plano para os geradores de resíduos elegíveis, o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) adquire caráter obrigatório de utilização em todo o território brasileiro, devendo ser emitido a cada movimentação de carga de resíduos sólidos realizada por todo gerador de resíduos, seja ele pessoa física ou jurídica. O controle da emissão do MTR cabe aos órgãos ambientais competentes que possuem sistemas de coleta, integração, sistematização e disponibilização de dados relacionados à gestão de resíduos sólidos em sua área de atuação (Brasil, 2020).

Denomina-se Sistema STR aquele que visa à operacionalização do controle da emissão do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), o qual possui três documentos principais comunicáveis entre si: (i) Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR); (ii) Certificado de Destinação de Resíduos (CDF) e (iii) Declaração de Movimentação de Resíduos (DMR) (Brasil, 2020).

O Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) é emitido somente pelo gerador, por meio do Sistema MTR, possuindo numeração sequencial e informações acerca do resíduo que está sendo encaminhado, o que inclui o gerador, o transportador, armazenador temporário – se for o caso e, o destinador. A operação completa ocorre apenas quando todos os envolvidos no fluxo estão corretamente cadastrados no sistema, devendo cada um atestar sua respectiva etapa da movimentação do resíduo (Brasil, 2020).

A Figura 1 detalha o caminhamento do resíduo em duas situações distintas: (i) no fluxo 1, o resíduo é encaminhado diretamente do gerador para o destinador; e (ii) no fluxo 2, o resíduo é conduzido ao armazenamento temporário e, após essa etapa, segue para o destinador.

Figura 1 – Fluxo de emissão do Manifesto de Transporte de Resíduos.



Fonte: Santos (2022).

Na situação do fluxo 1, ocorre somente a emissão de um Manifesto de Transporte de Resíduos pelo gerador. Já no caso descrito no fluxo 2, são emitidos dois MTRs, o primeiro emitido pelo gerador para o armazenador temporário e o segundo emitido do armazenador temporário para o destinador final (Santos, 2022).

O Certificado de Destinação Final de Resíduos (CDF) é um documento a ser expedido pelo destinador, a fim de atestar que os resíduos a ele encaminhados, receberam o tratamento ou a destinação adequada. Já a Declaração de Movimentação de Resíduos (DMR) consiste em um documento que registra a quantidade de resíduos sólidos, transportados e destinados por

geradores, transportadores e unidades de destinação por um determinado período (Brasil, 2020).

No caso deste estudo, o enfoque incide sobre o controle do local (destinador) para onde os resíduos são efetivamente encaminhados quando embarcados pelo gerador. De forma abrangente, o foco da preocupação estende-se também pelas condições em que ocorre o transporte do resíduo, tendo em vista os riscos existentes nessa operação. É essencial pontuar que, na atualidade, o contexto complexo na produção excessiva de resíduos sólidos favorece situações em que esses materiais são descartados de forma inapropriada. Tais ocorrências são ainda mais frequentes na medida em que não há comprometimento de alguns gestores industriais em atender às leis e normas acerca do assunto (Silva, 2019).

Ilustrando tais circunstâncias, destacam-se casos como o verificado no estado do Rio de Janeiro, em que se evidenciou que uma parcela considerável (30%) de geradores de resíduos do setor de construção civil não cumprem a legislação estadual para transporte de resíduos, incluindo o não preenchimento do Manifesto de Transporte de Resíduos (Santos & Qualharini, 2020).

Dentro do contexto de destinação final de resíduos industriais aqui abordado, é cabível inferir um rol de situações inapropriadas com potencial para culminar com a configuração de um crime ambiental, tipificado com base no art. 54 da Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998). Estabelecendo como exemplo a movimentação do resíduo do gerador A para o destinador B, por meio do transportador C, e considerando que tanto o gerador quanto destinador devem prestar contas ao órgão ambiental da quantidade de resíduos enviada e recebida, podem ser elencados alguns cenários de alerta: (i) a quantidade do resíduo relatado no MTR feito pelo gerador A não coincide com a quantidade relatada no CDF feito pelo destinador B; (ii) o gerador não possui autorização formal (licença) do órgão ambiental para enviar o resíduo para o destinador B; (iii) o transportador C não possui qualificação nem autorização para realizar o transporte do resíduo.

Partindo dessa perspectiva, o estudo almeja, então, avaliar a utilização da inteligência artificial como ferramenta para incrementar o controle da administração pública sobre a movimentação de resíduos, aumentando, por conseguinte, o controle social formal na gestão dos resíduos sólidos industriais, no intuito de evitar danos ao meio ambiente.

3.8 O uso da inteligência artificial na gestão pública de resíduos industriais

Na atualidade, as tecnologias digitais vêm promovendo transformações na forma como as questões relacionadas à sustentabilidade e ao meio ambiente estão sendo medidas e controladas. Tais mudanças disruptivas sem precedentes reúnem tecnologias digitais como inteligência artificial, Internet das Coisas e *Big Data* (Feroz et al., 2021).

Dentre o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, a inteligência artificial (IA) ganha notoriedade por conta da significativa evolução observada nos últimos anos. A IA consiste em um ramo da Ciência da Computação, proveniente da década de 1950, e que tem por finalidade analisar e interpretar os dados complexos, ao simular ou reproduzir a inteligência humana em máquinas (Welchen, 2019).

A real compreensão da magnitude da inteligência artificial e de seu considerável impacto no desenvolvimento somente é possível ao aceitar que a sua multiplicidade de subcampos e enfoques permite vislumbrar diferentes definições (Andrade; Machado; Rebouças, 2023). Em uma abordagem universal, entende-se a por inteligência artificial um ramo da ciência da computação que, utilizando algoritmos, é capaz de detectar um problema, ou uma tarefa a ser executada, e ainda analisar dados e tomar decisões, emulando a capacidade humana (Lobo, 2018).

A luta da ciência contra a poluição e a degradação dos recursos do meio ambiente representa uma dos mais relevantes desafios da atualidade, o que demanda especial atenção para o emprego de soluções digitais nesse sentido (Feroz et al., 2021).

Com base nessa visão, o uso da inteligência artificial tem se mostrado, em especial, um aliado de peso direcionado a efetivar a política climática. Com base no estudo *How AI can enable a Sustainable Future* - desenvolvido pela Price Waterhouse a pedido da Microsoft – identificou-se que o uso de ferramentas de inteligência artificial na gestão ambiental pode contribuir para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa em 4%, para o ano de 2030 (Microsoft, 2023). Outras aplicações da

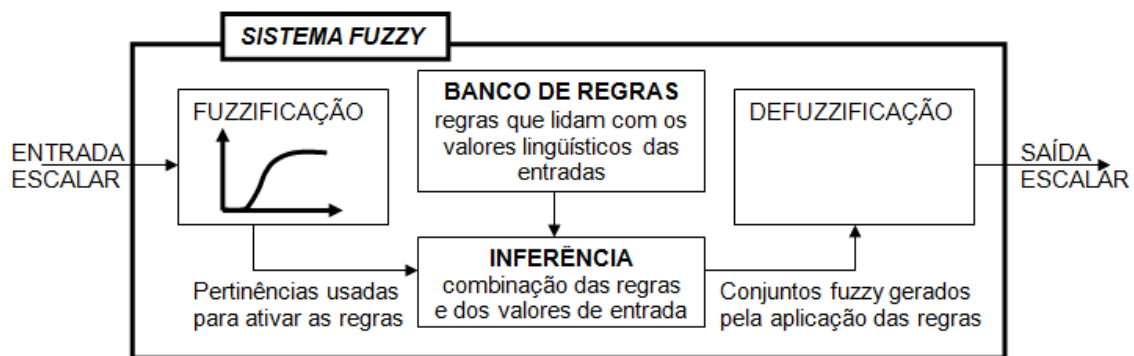
inteligência artificial são utilizadas com êxito no gerenciamento de água, da saúde, da agricultura e em diversas outras áreas alinhadas com a pauta da sustentabilidade em todo o mundo (Andrade et al., 2023).

No campo das questões relacionadas ao meio ambiente, emerge a utilização da Lógica Fuzzy, que é uma lógica multivalorada, apta a absorver informações vagas, normalmente apresentadas em língua falada ou escrita, convertidas na sequência para um formato numérico, de simples manipulação computacional. A partir daí, busca modelar os modos imprecisos do raciocínio humano, provendo suporte às tomadas de decisão (Biondi Neto, 2012).

Basicamente, a Lógica Fuzzy trata com variáveis imprecisas visando a modelar o raciocínio. Em lugar de considerar a ambivalência (verdadeiro/falso) da lógica clássica, constroi modos de raciocínio que são aproximados e não mais exatos, o que permite capturar conceitos vagos da linguagem natural (falada ou escrita), convertendo-as para um formato numérico, facilmente manipulável pelos computadores (Gil, 2023).

Assim, os Sistemas Fuzzy fazem uso de conjuntos *fuzzy* para *fuzzyficar* valores escalares do mundo real, a fim de manipulá-los como valores linguísticos. São utilizadas regras de inferência expressas com valores linguísticos, que lidam com valores de pertinência visando à produção de conjuntos *fuzzy* resultantes que, em um processo de *defuzzyficação*, tornam os valores escalares aplicáveis ao mundo real (Gil, 2023). A Figura 2 ilustra esse fluxo:

Figura 2 - Sistema Fuzzy.



Fonte: Gil, M.C.C. Inteligência artificial. 25 out. 2023. Apresentação do Power Point.

Em função dessas características, o uso da Lógica Fuzzy pode ser de grande valia na gestão de resíduos realizada pela administração pública, na medida em que possibilita identificar cenários de alerta que apontem a necessidade de uma investigação mais profunda e acurada por parte dos órgãos de controle ambiental (Gil, 2023).

Dessa forma, não somente identificam-se discrepâncias nos preenchimentos dos formulários eletrônicos do Manifesto de Transporte de Resíduos, sendo possível disparar a atenção das agências ambientais para condições específicas que carecem de especial atenção. Tais circunstâncias podem envolver, por exemplo, situações em que o destinador do resíduo está localizado em uma área de condições ambientais vulneráveis – o que demandaria uma atenção diferenciada por parte dos agentes ambientais (Gil, 2023).

Oportuno pontuar que a utilização exitosa da inteligência artificial no âmbito das ciências ambientais demanda o atendimento a determinados pontos. O primeiro deles a ser destacado refere-se à construção do banco de dados, que deve abarcar dados verdadeiramente representativos, e que considerem as especificidades da geodiversidade (McGovern, 2022).

A multidisciplinaridade necessária às questões de gestão ambiental torna também essencial a existência de especialistas humanos devidamente preparados a efetuar a interpretação dos dados, por meio de seu conhecimento tácito adquirido (Melo, 2021). Ressalta-se, pois, a relevância do treinamento adequado aos agentes públicos, a fim de qualificá-los a executar análises eficazes e precisas, bem como as fiscalizações necessárias, com o objetivo de se evitarem os desastres ambientais (Salib; Garcia,

2021).

Adicionalmente, menciona-se o aspecto do possível enviesamento, possível de ocorrer no uso da inteligência artificial para a tomada de decisão, seja no processo de programação ou de aprendizagem. A realização de um processo de desenviesaste, nesse sentido, busca a imparcialidade e evita as armadilhas cognitivas (Silveira & Filter, 2020).

Ao fim e ao cabo das análises, é possível então inferir que a utilização da inteligência artificial nas tomadas de decisão no âmbito da gestão ambiental mostra-se necessária e urgente, ao se perceber que a tecnologia possui o condão de prevalecer as políticas ambientais, apontando para a linha do desenvolvimento verdadeiramente sustentável. Lado outro, não se deve olvidar que cabem investimentos de auditoria e fiscalização capazes de detecção de falhas de programação, na intenção de tornar os sistemas plenamente confiáveis (Silveira & Filter, 2020).

4. Considerações Finais

O desenvolvimento tecnológico industrial, vivenciado nas últimas décadas, tem contribuído de forma bastante expressiva para a geração de quantidades consideráveis de resíduos, configurando uma questão das mais relevantes no âmbito da gestão ambiental. Corroborar-se essa preocupação ao se considerar que uma parcela representativa desses resíduos são caracterizados como perigosos, possuindo alto potencial de contaminação ao meio ambiente e constituindo uma questão de saúde pública.

Com frequência os resíduos gerados nas atividades industriais são destinados de forma inapropriada, aumentando os riscos de acidentes ambientais e de outras situações capazes de causar danos ao meio ambiente, muitos deles não passíveis de reversão. Nessa senda, emerge a relevância da realização do controle social formal por parte da administração pública – na figura do Estado e das demais instâncias jurídicas – no sentido de coibir as situações envolvendo a disposição final de resíduos de maneira inadequada.

Hodiernamente os órgãos de controle ambiental buscam aprimorar os instrumentos de controle na gestão de resíduos, o que inclui o monitoramento de informações sistematizadas em bancos de dados alimentados pelos geradores e pelos destinadores dos resíduos. Percebe-se, pois, a existência de um manancial de possibilidades no que tange à implementação e ao uso de ferramentas de inteligência artificial no sentido de incrementar tal controle, possibilitando à administração pública a identificação precoce de situações irregulares relacionadas ao transporte e à destinação final de resíduos.

A utilização da inteligência artificial – e em especial da Lógica Fuzzy - pode mostrar-se exitosa no controle social formal exercido pelos órgãos de controle ambiental em suas respectivas áreas de atuação, na medida em que facilita localizar discrepâncias nas informações alimentadas nos bancos de dados, em especial quanto à quantidade de resíduos transportada, às condições de segurança em que tal transporte acontece e ao local para onde os resíduos são destinados.

Tais ações, de caráter preventivo, tornam possível aos agentes públicos atuar de forma célere e eficaz na coerção de um possível crime ambiental, tipificado conforme disposto no art. 54, da Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998). Cabe destacar ainda que, ao atuar diligentemente para evitar o crime ambiental antes de sua ocorrência, a administração pública evita que ocorra um dano ambiental que, em função de sua magnitude e demais características, pode ser de cunho irreversível.

Em que pesem as vantagens da utilização da inteligência artificial no âmbito do controle social formal nas agências ambientais, cabe ressaltar que essas ações demandam investimentos para o desenvolvimento das tecnologias necessárias, assim como para o treinamento dos servidores designados para seu uso. Ainda assim, é possível inferir que os pontos positivos decorrentes da adoção da IA suplantam os eventuais desafios para sua implementação na esfera das empresas públicas.

Para estudos futuros, recomenda-se ampliar esta análise, abordando a relevância da fiscalização ambiental *in loco* com abrangência para os geradores e os destinadores de resíduos cadastrados nos órgãos de controle ambiental.

Referências

- Alves, L. G. S. et al. (2021). *Responsabilidade compartilhada de resíduos sólidos: reflexões da implementação no município de Teresina – PI*. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, 18(2), 03-25.
- Andrade, M. L., Machado, C. A. A., & Rebouças, G. M. (2023). *Desenvolvimento sustentável e inteligência artificial no Poder Judiciário: avanços e desafios à luz de 2030*. *Revista Direito Público*, 20(105), 478-500.
- Antunes, P. B. (2016). *Direito ambiental*. Imprensa: (18a ed.), Atlas.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2004) *NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação*, p. 71.
- Barros, R. M. (2012). *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Interciência.
- Beck, U. (2018). *A metamorfose do mundo: novos conceitos para uma nova realidade*. Zahar.
- Bianchini, M. P. A., Araújo, G. M., & Oliveira, A. R. M. (2022). *A Lei de Crimes Ambientais e o Princípio da Vedação à Proteção Deficiente: uma análise dos crimes ambientais no contexto do rompimento da barragem em Brumadinho/MG*. *Revista Meritum*, 17(1), 146-158.
- Bim, E. F. (2020). *Licenciamento ambiental*. (5a ed.), Fórum.
- Biondi Neto, L. (2012). *Sistemas Fuzzy*. 28 out. Apresentação do Power Point.
- Braga, B. et al. (2005). *Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável*. (2a ed.), Pearson Prentice Hall.
- Brasil. (1941). *Código de Processo Penal. Decreto-Lei nº 3.689, de 03 de outubro de 1941*. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 de outubro, p. 19.969.
- Brasil. (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil, de 5 de outubro de 1988*. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.
- Brasil. (2010). *Decreto n. 7.404, de 23 de dezembro de 2010*. Regulamenta a Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 23 de dezembro, Seção 1, Edição Extra.
- Brasil. (1981). Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1- 2-9, p. 16509.
- Brasil. (1998). *Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998*. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção Divisão de Orçamento, Finanças e Contabilidade – DOFC – 13-2, p. 1.
- Brasil. (2012) *Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 03 de agosto, Seção 1.
- Brasil. (2020). *Portaria n. 280, de 29 de junho de 2020*. Institui o Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR nacional, como ferramenta de gestão e documento declaratório de implantação e operacionalização do plano de gerenciamento de resíduos e dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 de junho.
- Brasil. (1997). *Resolução CONAMA n. 237, de 19 de dezembro de 1997*. Dispõe sobre os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental e no exercício da competência, bem como as atividades e empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental. *Diário Oficial da União*, Brasília, Seção 1.
- Calijuri, M. C., & Cunha, D. G. F. (2013). *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. Elsevier.
- Capez, F. (2022). *Curso de Direito Penal – Parte geral: Arts. 1º a 120*. (26a ed.), Saraiva.
- Carson, R. L. (2010). *Primavera silenciosa*. Gaia.
- Carvalho, D. W. (2017). *Gestão jurídica ambiental*. Editora Revista dos Tribunais.
- Chand Malav, L. et al. (2020). *A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities*. *Journal of Cleaner Production*, 277, 1-22.
- Costa Neto, N. D. C. (2003). *Proteção jurídica do meio ambiente*. Del Rey.
- Creswell, J. W. (2010). *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. (3a ed.), Bookman Artmed.
- Farias, T. (2022). *Licenciamento ambiental: aspectos teóricos e práticos*. (8a ed.), Fórum.
- Feroz, A. B., Zo, H., & Chiravuri, A. (2021). *Digital Transformation and Environmental Sustainability: A Review and Research Agenda*. *Sustainability*, 13, 1-20.
- Fiorillo, C. A. P. (2014). *Curso de Direito Ambiental Brasileiro*. (15a ed.), Saraiva.
- Gil, A. C. (2016). *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. Atlas.
- Gil, M. C. C. (2023). *Inteligência artificial*. 25 out. Apresentação do Power Point.
- Gomes, L. F., & Maciel, S. (2011). *Crimes ambientais: comentários à Lei 9.605/1998*. Ed. RT.

- Gusmão, A. C. F., & De Martini, L. C. (2009). *Gestão Ambiental na indústria*. SMS Digital.
- The World Bank. (2022). *Solid Waste Management*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
- Larenz, K. (1938). *Über Gegenstand und Methode völkischen Rechtsdenkens*. Junker & Dünhaupt.
- Leite, M. R. S. (2021). *Lei de Crimes Ambientais: análise de sua eficácia na tutela do meio ambiente através de incriminações de perigo abstrato*. 2021.87 f. *Dissertação (Mestrado em Direito)*. Programa em Pós-graduação em Direito Ambiental e Sustentabilidade, Universidade Católica de Santos, Santos (SP).
- Lobo, L. C. (2018). *Inteligência artificial, o futuro da medicina e a educação médica*. *Revista Brasileira de educação Médica*, Rio de Janeiro, 42(3), p. 3-8.
- Lopez, T. A. (2010). *Princípio da precaução e evolução da responsabilidade civil*. Quartier Latin.
- Machado, P. A. L. (2016). *Direito Ambiental Brasileiro*. (25a ed.), Malheiros.
- Marchesan, A. M. M., Steigleder, A.M., & Cappelli, S. (2008). *Direito Ambiental*. Verbo Jurídico.
- Martinelli, J. P., Bem, L. S. (2023). *Direito Penal parte geral: lições fundamentais*. (8a ed.), D' Plácido.
- McGovern, A. et al. (2022). *Why we need to focus on developing ethical, responsible, and trustworthy artificial intelligence approaches for environmental science*. *Environmental Data Science*, 1, 1-15.
- Melhen, J. E., Zanini, L. E. A. (2020). *Principiologia ambiental contemporânea: da dignidade humana à sociedade de risco*. *Revista Magister de Direito Ambiental e Urbanístico*, 92, 31-56.
- Melo, J. D. et al. (2021). *Sistema especialista para o domínio do Licenciamento Ambiental: estudo de caso com Shell Expert Sinta*. *Brazilian Journal of Development*, 7(1), 4297- 4313.
- Microsoft Corporation, Price Waterhouse Coopers – PWC. (2019). *How AI can enable a Sustainable Future*. <https://news.microsoft.com/wp-content/uploads/prod/sites/53/2019/04/PwC-Executive-Summary.pdf>
- Milaré, E. (2020). *Direito do ambiente*. (12a ed.), Thomas Reuters Brasil.
- Passos, P. N. C. (2009). *A Conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente*. *Revista Direitos Fundamentais & Democracia*, 6, 1-25.
- Philippi Jr., A. (2005). *Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável*. Manole.
- Pinto, E. C. *A importância do cumprimento de condicionantes da licença ambiental*. <https://matanativa.com.br/cumprimento-de-condicionantes-da-licenca-ambiental/#:~:text=Por%20Elis%20Christina%20Pinto&text=As%20condicionantes%20ambientais%20s%C3%A3o%20uma,do%20empreendimento%20e%20Fou%20atividade>.
- Ponte, L. E. P. et al. (2022). *A tutela penal como fator de educação ambiental na sociedade brasileira*. *Research, Society and Development*, 11(6), 1-20.
- Prado, L. R. (2019). *Direito Penal do ambiente: crimes ambientais (Lei 9.605/1998)*. (7a ed.), Forense.
- Prado, L. R. (2005). *Direito Penal do Ambiente*. Editora Revista dos Tribunais.
- Prado, L. R. (2003). *Bem jurídico-penal e Constituição*. (3a ed.), Ed. RT.
- Prado, L.R. (1999). *Curso de Direito Penal Brasileiro: Parte Geral*. Revista dos Tribunais.
- Prado, L. R. (1992). *Direito Penal Ambiental*. Editora Revista dos Tribunais.
- Prajapati, P. et al. (2021). *Critical review on technological advancements for effective waste management of solid waste – updates and way forward*. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 1-12.
- Prestes, V. B. (2002). *A necessidade de compatibilização das licenças ambiental e urbanística no processo de municipalização do licenciamento ambiental*. *Fórum de Direito Urbano e Ambiental – FDUÁ*, 1(5), 447-452.
- Prieur, M. (1984). *Droit de l' Environnement*. Dalloz.
- Querino, A. C., & Heringer, H. M. L. (2019). *A construção civil na Política Nacional de Resíduos Sólidos: transformações ambientais a partir do controle social e ação civil pública*. In: *Congresso Brasileiro de Processo Coletivo e Cidadania*. Anais...São Paulo, Brasil: UNAERP.
- Ribeiro. M. S. (2010). *Contabilidade Ambiental*. Editora Saraiva.
- Roxin, C. (1997). *Derecho Penal: Parte General*. Civitas.
- Salib, M. L. L., & Garcia, D. S. S. (2021). *O uso da inteligência artificial e dos algoritmos no licenciamento ambiental e no princípio da precaução*. *Conpedi Law Review*, 7(1), 01-20.
- Salvino, E., Soares, I., & Cavalcante, G. (2022). *Crimes de perigo abstrato: uma análise quanto à sua constitucionalidade e suas implicações jurídicas*. <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/22702>.

- Santos, A. O. et al. (2001). *Contabilidade Ambiental: Um Estudo sobre sua Aplicabilidade em Empresas Brasileiras*. Revista Contabilidade & Finanças - FEA - USP, São Paulo, FIEP/CAFI, 16(27), 89 - 99.
- Santos, L. A. P., & Rosendo, J. S. (2019). *Discussão teórica da legislação sobre os crimes ambientais*. Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium, 10(2), 19-31.
- Santos, L. C. M., & Qualharini, E. L. (2020). *Percepções sobre sustentabilidade em canteiros de obra no Estado do Rio de Janeiro*. In: 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Anais...Rio Grande do Sul, Brasil: IBEAS.
- Santos, M. C. S. (2022). *Manifesto de transporte de resíduos sólidos e geração de informações sobre resíduos no Brasil*. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Campinas.
- Santos, M. J., Rodrigues, A. S. S., & Andrade, J. V. (2022). *Os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos sólidos*. *Ánima Educação*. <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/8d3511f6-c120-4bdb-86be-44f0ece779f3>.
- Sgubbi, F. (1975). *Tutela penale di interessi difusi*. La questione criminale.
- Silva, I. L. (2008). *Princípio da insignificância e os crimes ambientais*. Lumen Juris.
- Silva, I. (2021). *Crimes ambientais e juizados especiais*. (3a ed.), Juruá Editora.
- Silva, L. M. B., Silva, J. P., & Borges, M. A. L. (2019). *Do global ao contexto nacional: a evolução da política ambiental brasileira*. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 6(14), 593-608.
- Silva, M. M. et al. (2019). *Práticas de gerenciamento de resíduos industriais no Brasil*. Brazilian Journal of Production Engineer, 5(3), 251-261.
- Silva, T. F. D. (2016). *O termo de ajustamento de conduta como forma alternativa à jurisdicionalização na solução dos conflitos ambientais*. Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo, 2(1), 17-32.
- Silveira, P. A. C. V., & Filter, P. A. S. (2020). *A tomada de decisão ecológica e artificial: uma análise da participação da inteligência artificial na proteção ambiental com a utilização do IPTU ecológico*. Revista do Programa de Pós-Graduação em Direito da UFC, 40(1), 19-34.
- Sirvinskas, L. P. (2018). *Manual de Direito Ambiental*. (16a ed.), Saraiva.
- Vergara, S. C. (2014). *Projetos e relatórios de pesquisa em Administração*. (15a ed.0, Editora Atlas S.A.
- Welchen, V. (2019). *Uso de inteligência artificial em apoio à decisão clínica: o caso do Hospital do Câncer Mãe de Deus com a ferramenta cognitiva Watson for Oncology*. 218 f. Dissertação (Mestrado em Administração). Programa de Pós-graduação em Administração, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.