

SEÇÃO ESPECIAL - TEMÁTICA AMBIENTAL

O GRITO DA CAATINGA: IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DO DESMATAMENTO E A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO ESPERANÇA DE DIAS MELHORES

THE CRY OF THE CAATINGA: SOCIOECONOMIC IMPACTS OF DEFORESTATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS HOPE FOR BETTER DAYS

Luciano Nunes Maia Freire

Doutorando em Direito Constitucional e Teoria Política pela Universidade de Fortaleza (2024). Mestre em Ciência Política pela Universidade de Lisboa (2020). Desembargador Eleitoral Titular do Tribunal Regional Eleitoral do Ceará (TRE/CE). Diretor Geral da Escola Judiciária Eleitoral Cearense (EJEC). Juiz de Direito do Tribunal de Justiça do Ceará (TJ/CE). Juiz Coordenador do Núcleo de Cooperação Judiciária do TJ/CE. Conselheiro do Conselho Nacional do Ministério Público (CNMP), de 2017 a 2021, período no qual também exerceu a presidência da Comissão de Defesa de Direitos Fundamentais (CDDF), Comissão do Meio Ambiente (CMA) e da Estratégia Nacional de Segurança Pública (ENASP). Integrou a composição inicial do Observatório Nacional de Grandes Desastres Socioambientais, instituído em 2019, pelas presidências do Conselho Nacional de Justiça (CNJ) e Conselho Nacional do Ministério Público (CNMP). Juiz Assessor Interinstitucional do CNJ/CNMP, de 2021 a 2023.

E-mail: lucianonmf1982@gmail.com

Gina Vidal Marcílio Pompeu

Pós-Doutora em Direito Econômico pela Universidade de Lisboa (UL), Lisboa, Portugal. Pós-Doutora em Direitos Humanos, Econômicos e Responsabilidade Social pela Université Havre, Le Havre, França. Doutora em Direito pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, Brasil. Mestre em Direito e Desenvolvimento pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza/CE. Graduada em Direito pela UFC. Professora Titular de Direito Constitucional e do Programa de Pós-Graduação em Direito Constitucional na Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Fortaleza/CE, Brasil. Advogada. E-mail: ginapompeu@unifor.br

Resumo: A Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro de inestimável valor, enfrenta desafios significativos devido ao desmatamento ilegal, que gera perda de biodiversidade, desertificação e graves impactos socioeconômicos, como pobreza e insegurança hídrica para as comunidades locais. Nesse cenário, a inteligência artificial (IA) surge como uma ferramenta revolucionária para o monitoramento e combate a essas práticas. Este artigo explora a aplicação de técnicas de IA para aprimorar a detecção de atividades ilícitas, otimizar a fiscalização e subsidiar a tomada de decisões. Conclui-se que o uso estratégico da IA pode identificar padrões de desmatamento, prever áreas de risco e apoiar o manejo sustentável, promovendo a conservação do bioma e o desenvolvimento socioambiental da região.

Palavras-chave: Caatinga; desmatamento ilegal; impactos socioeconômicos; mecanismos de combate; inteligência artificial.

Abstract: *The Caatinga, an exclusively Brazilian biome of inestimable value, faces significant challenges due to illegal deforestation, which leads to biodiversity loss, desertification, and severe socioeconomic impacts, such as poverty and water insecurity for local communities. In this scenario, artificial intelligence (AI) emerges as a revolutionary tool for monitoring and combating these practices. This article explores the application of AI techniques to improve the detection of illicit activities, optimize enforcement, and support decision-making. It is concluded that the strategic use of AI can identify deforestation patterns, predict risk areas, and support sustainable management, promoting the conservation of the biome and the socio-environmental development of the region.*

Keywords: Caatinga; illegal deforestation; socioeconomic impacts; combat mechanisms; artificial intelligence.

Sumário: Introdução; 1. A Situação do Desmatamento Ilegal do Bioma Caatinga; 2. Impactos Socioeconômicos do Desmatamento Ilegal no Bioma Caatinga; 3. Mecanismos de Combate ao Desmatamento Ilegal e o Auxílio da Inteligência Artificial; 4. Planos e Mecanismos de Combate ao Desmatamento Ilegal e o Uso da Inteligência Artificial no Bioma Caatinga; Conclusão; Referências.

INTRODUÇÃO

A Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, representa patrimônio natural de inestimável valor ecológico, social e econômico para o país. Essa floresta tropical seca, que abrange uma vasta área do Nordeste e parte de Minas Gerais, abriga uma biodiversidade singular, adaptada às condições climáticas semiáridas.

Apesar de sua relevância, a Caatinga historicamente recebeu menor atenção em comparação com outros biomas brasileiros, como a Amazônia e a Mata Atlântica, o que a torna particularmente vulnerável a diversas formas de degradação ambiental, com destaque para o desmatamento ilegal.

A exploração não sustentável de seus recursos naturais, impulsionada por diversos fatores como a expansão agropecuária, a extração de lenha e carvão vegetal, entre outros, tem comprometido a integridade desse ecossistema, de modo a gerar não apenas impactos negativos na biodiversidade e nos recursos hídricos, mas também graves consequências socioeconômicas para as comunidades locais, inclusive o agravamento da pobreza, a insegurança alimentar e a intensificação de processos como a desertificação, que comprometem seus meios de subsistência.

Diante desse cenário, a busca por soluções inovadoras e eficientes para o monitoramento e o combate ao desmatamento ilegal na Caatinga apresenta-se como medida fundamental de governança. Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) surge como ferramenta promissora para auxiliar no monitoramento, fiscalização e combate ao desmatamento ilegal, ao oferecer a capacidade de analisar grandes volumes de dados, identificar padrões e prever áreas de risco com maior precisão e agilidade, de maneira a contribuir para estratégias que considerem tanto a dimensão ambiental quanto a social.

O presente estudo tem como objetivo analisar criticamente o uso da inteligência artificial no combate ao desmatamento ilegal na Caatinga ao buscar compreender o estado atual desse bioma, bem como seus desafios socioambientais, além dos próprios desafios e perspectivas específicos para a aplicação dessa tecnologia na sua proteção. A problemática, portanto, reside na necessidade de analisar a (in)suficiência dos recursos atuais para combate ao desmatamento ilegal da Caatinga, haja vista seus impactos multifacetados, bem como entender se a IA possui capacidade para auxiliar (ou não) na luta contra às práticas ilegais que assolam o referido bioma.

O artigo organiza-se em três capítulos, além da introdução e da conclusão. O primeiro capítulo apresenta uma abordagem geral acerca da situação do desmatamento ilegal no bioma Caatinga, com o intuito de contextualizar a problemática e destacar a relevância da busca por soluções eficazes. O segundo capítulo aprofunda a análise sobre os impactos socioeconômicos decorrentes do desmatamento ilegal no bioma, de modo a evidenciar a intrínseca relação entre a degradação ambiental e a vulnerabilidade social na região. O terceiro capítulo analisa os mecanismos

de combate ao desmatamento ilegal nos biomas em geral, inclusive como a IA tem auxiliado neste ponto, e busca identificar as melhores práticas e lições aprendidas que possam ser aplicadas à realidade da Caatinga. Por fim, o quarto capítulo se volta especificamente para os planos de combate ao desmatamento ilegal na Caatinga e analisa o uso (ou a ausência) de IA nesse bioma, bem como os desafios e o potencial de sua aplicação.

A metodologia empregada é de caráter qualitativo, que combina análise documental de legislação, planos de ação, e estudos científicos, complementada por revisão bibliográfica sobre o tema. Objetiva-se que o estudo contribua para a formulação de políticas públicas e ações judiciais mais efetivas, de maneira a concretizar a justiça socioambiental e a sustentabilidade na Caatinga, garantindo-se a conservação desse importante bioma brasileiro e o bem-estar de suas populações.

1. A SITUAÇÃO DO DESMATAMENTO ILEGAL DO BIOMA CAATINGA

O bioma Caatinga, que se estende por grande parte do Nordeste brasileiro e pelo norte de Minas Gerais, possui área de aproximadamente 862.818 km² (oitocentos e sessenta e dois mil, oitocentos e dezoito quilômetros quadrados), o que representa cerca de 11% (onze por cento) do território nacional (Brasil, 2024, p. 15). Essa extensa área abriga notável diversidade biológica, caracterizada por espécies vegetais e animais únicas, adaptadas às condições semiáridas predominantes, de modo que desempenha papel indispensável na manutenção do equilíbrio ecológico da região, além de oferecer serviços ambientais essenciais, como a regulação do ciclo hidrológico, a conservação do solo e a manutenção da biodiversidade.

Acerca desse bioma, destaca Melo et al (2023, p. 3):

A Caatinga se destaca por apresentar uma vegetação composta predominantemente por espécies de baixa a média estatura, principalmente arvoretas e arbustos. Muitas dessas espécies são sofisticadamente adaptadas às condições do ambiente semiárido, demonstrando uma variedade de estratégias para assegurar sua sobrevivência. Estas incluem a capacidade de reter água nos tecidos, a queda de folhas para minimizar a perda de umidade durante os períodos de seca e ciclos de floração definidos conforme

os períodos chuvosos, bem como adaptações fisiológicas que refletem na produção de metabólitos e proteínas especializados. Além disso, as espécies da Caatinga podem estar adaptadas a longos períodos de seca, enquanto algumas espécies podem ser extremamente vulneráveis a mudanças climáticas rápidas. Apesar da alta diversidade, atualmente apenas metade de sua floresta original está preservada, sendo que a maior parte continua desprotegida por lei.

Apesar de sua importância socioambiental, a Caatinga é um dos biomas mais ameaçados do Brasil. Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) revelam que o bioma já perdeu 40% (quarenta por cento) de sua vegetação nativa, o que equivale a aproximadamente 34 milhões de hectares, extensão comparável ao estado de Goiás (Carvalho, 2024), além de que menos de 10% (dez por cento) de sua área está protegida por Unidades de Conservação (UCs). O estado da Bahia lidera o ranking de desmatamento, seguido pelo Ceará e Piauí; a situação é agravada pela alta fragmentação dos remanescentes florestais e pela antropização¹ da maior parte das áreas:

O bioma Caatinga ocorre na região Nordeste, com área em todos os estados da região, com exceção do Maranhão, e no norte de Minas Gerais, representando aproximadamente 10% do território nacional e abrigando uma população de quase 32 milhões de pessoas. O bioma é caracterizado pela alta diversidade de solos, vegetação, ambientes e paisagens, e já perdeu 42,6% de sua vegetação nativa. Nesse contexto, menos de 10% do bioma é protegido, a fragmentação dos remanescentes é alta e a maioria das áreas já sofreu antropização. (Brasil, 2024, p. 13).

O desmatamento do ecossistema é impulsionado por diversos fatores relacionados à constante exploração de seus recursos naturais, como a expansão da agropecuária, a extração de biomassa para fins energéticos, a implantação de projetos de energia eólica e solar, a mineração, entre outros (Brasil, 2024, p. 13-14). O resultado é a perda de habitat, a fragmentação dos ecossistemas, a diminuição da biodiversidade e a degradação dos serviços ecossistêmicos.

¹ Antropização (do grego *ánthropos*, homem) designa o conjunto de alterações provocadas pela atividade humana nos ecossistemas e na paisagem natural. Essas transformações podem variar em intensidade, desde modificações leves até a substituição completa da cobertura original do solo por estruturas urbanas, agrícolas ou industriais, de maneira a impactar na biodiversidade e nos processos ecológicos.

Estima-se que grande parte do desmatamento no bioma ocorra dentro dos limites estabelecidos pela legislação, sendo cerca de 21% (vinte e um por cento) do desmatamento total considerado ilegal. No entanto, análise de dados públicos e autorizações de supressão no bioma disponíveis no Sinaflor/Ibama e disponibilizados pelos estados revela resultados diferentes. O cruzamento de Autorizações de Supressão de Vegetação (ASV) com dados de desmatamento observados pelo Prodes/Inpe, entre 2018 e 2022, indica que 94% (noventa e quatro por cento) da perda de vegetação ocorreu sem qualquer autorização válida. Ademais, a legislação permite a supressão de vegetação nativa em áreas de Reserva Legal, o que, aliado à dificuldade de obtenção de dados abrangentes sobre autorizações de supressão, dificulta o controle do desmatamento:

Tendo em vista a grande área de excedente de reserva legal e o percentual de 20% de Reserva Legal, é de se esperar que grande parte do desmatamento no bioma ocorra dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Estima-se com base na análise da vegetação nativa dos imóveis dentro do CAR, UCs, TIs e assentamentos que cerca de 21% do desmatamento total no bioma seja ilegal (MCTI, 2017). Porém, uma análise de dados públicos e autorizações de supressão no bioma disponíveis no Sinaflor/Ibama e disponibilizados pelos estados apresenta resultados diferentes. O cruzamento de Autorizações de Supressão de Vegetação (ASV) com dados de desmatamento observado Prodes/Inpe entre 2018 e 2022 indica que 94% da perda da vegetação ocorreu sem uma autorização válida. (Brasil, 2024, p. 50).

O desmatamento no bioma Caatinga apresenta características específicas que o diferenciam de outros biomas brasileiros. Uma delas é a predominância de pequenos desmatamentos, muitas vezes realizados por pequenos produtores para atividades de subsistência, muitas vezes de forma não sustentável, o que leva à perda de vegetação nativa e à degradação do solo². Outra característica é a forte demanda por biomassa (lenha e carvão vegetal) como fonte de energia para uso doméstico e industrial, porquanto

² A avaliação do tamanho dos polígonos possibilita verificar que o desmatamento no bioma é caracterizado, em grande parte, por desmatamentos pequenos, menores do que 10 hectares. A partir de 2008, o desmatamento até 10 hectares responde por mais de 50% do total registrado no bioma. Uma das possíveis justificativas para tal comportamento é que isso pode ser fruto de atividades de pequenos produtores ou de atividades que não demandam, de uma vez só, a abertura de grandes áreas. Complementarmente, analisando-se os polígonos de desmatamento menores que 10 ha e aqueles entre 10 e 50 ha, verifica-se que eles correspondem conjuntamente a 80% dos polígonos de desmatamento registrados no bioma (Tabela 10). (Brasil, 2024, p. 47-48).

sua extração, muitas vezes de forma ilegal e predatória, exerce influência negativa sobre a vegetação nativa.

A conversão de áreas de vegetação nativa para pastagens e agricultura também gera impacto deletério sobre a Caatinga, especialmente com o avanço da fronteira agrícola e a intensificação da pecuária na região. O processo de conversão de áreas de vegetação nativa em pastagens, associada ao sobrepastoreio (sobreutilização de uma área de pastagem por animais, sem dar tempo suficiente para a recuperação da vegetação), causa a degradação do solo e a perda de biodiversidade (Alencar, 2022).

A mineração e a expansão urbana, embora em menor escala, também exercem pressão sobre a vegetação nativa da Caatinga. A exploração de recursos minerais e a construção de novas áreas urbanas demandam a supressão de vegetação e a alteração do uso do solo, o que compromete a biodiversidade da Caatinga e intensifica os processos de degradação ambiental (Brasil, 2024, p. 61-62). Além disso, vetores de desmatamento têm ganhado relevância nos últimos anos, como a instalação de parques eólicos e usinas fotovoltaicas, os quais, quanto sejam fontes de energia renovável, podem causar desmatamento para a implantação de suas infraestruturas, além de outros impactos ambientais e socioeconômicos (Brasil, 2024, p. 19).

As consequências do desmatamento ilegal na Caatinga, assim como em qualquer outro bioma, são multifacetadas e impactam negativamente o meio ambiente e a sociedade. A perda da cobertura vegetal intensifica os processos erosivos, o que gera empobrecimento do solo e diminuição da sua capacidade produtiva. A escassez de água, característica do clima semiárido, por sua vez, agrava-se com o desmatamento e compromete o abastecimento humano e animal, além de intensificar a vulnerabilidade das comunidades locais aos efeitos da seca. Ademais, o desmatamento contribui para a perda de biodiversidade, com a extinção de espécies de plantas e animais, a fragilização dos ecossistemas e a diminuição dos serviços ecossistêmicos.

O desmatamento na Caatinga encontra-se intrinsecamente ligado a questões sociais e econômicas, como a pobreza, a desigualdade social e a falta de alternativas econômicas para a população local, o que

impulsionam a exploração predatória dos recursos naturais. Em muitos casos, comunidades empobrecidas recorrem a práticas insustentáveis, como a produção de carvão e o desmatamento para agricultura, como forma de subsistência, o que exige do Poder Público uma abordagem integrada que considere as dimensões sociais, econômicas e ambientais do problema (No Clima da Caatinga, [s.d.]).

Diante desse cenário, os órgãos integrantes do sistema de prevenção a danos ambientais precisam implementar ações efetivas para combater o desmatamento ilegal no bioma Caatinga e promover o uso sustentável de seus recursos naturais. A inteligência artificial apresenta-se como ferramenta promissora para colaborar eficientemente nesse desafio, pois oferece a capacidade de monitorar e fiscalizar as ilegalidades perpetradas contra o ecossistema.

2. IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS DO DESMATAMENTO ILEGAL NO BIOMA CAATINGA

A degradação ambiental, manifestada de forma proeminente pelo desmatamento, transcende as fronteiras ecológicas e repercute profundamente nas esferas social e econômica das populações humanas. Em uma escala global, a supressão de coberturas vegetais nativas, independentemente do bioma, desencadeia uma série de consequências que comprometem a sustentabilidade dos meios de vida e a estabilidade econômica de inúmeras comunidades.

A perda de biodiversidade, intrinsecamente ligada ao desmatamento, implica a redução de serviços ecossistêmicos vitais, como a regulação climática, a polinização, o controle de erosão e a purificação da água, serviços estes que sustentam direta e indiretamente atividades econômicas essenciais, como a agricultura, a pesca e o turismo. A remoção da vegetação expõe os solos a processos erosivos intensificados, o que diminui a fertilidade e a capacidade produtiva das terras, impacta a segurança alimentar e pode levar à necessidade de migração de populações rurais em busca de novas oportunidades, fenômeno observado em diversas partes do globo (IPPC, 2023).

Ademais, a exploração madeireira ilegal e a conversão de florestas para outros usos frequentemente se associam a conflitos fundiários, violações de direitos de comunidades tradicionais e indígenas e à precarização das condições de trabalho, o que aprofunda quadros de desigualdade e vulnerabilidade social.

No contexto brasileiro, essa dinâmica se manifesta com particularidades em cada bioma, mas compartilha a raiz comum da exploração insustentável dos recursos naturais como motor de impactos socioeconômicos adversos. Com efeito, a expansão de fronteiras agrícolas, a exploração madeireira predatória e a mineração, embora gerem riqueza em curto prazo para determinados setores, frequentemente resultam em externalidades negativas que recaem sobre as populações locais e sobre a sociedade como um todo, na forma de degradação ambiental, perda de capital natural e comprometimento de futuras gerações.

Ao direcionar o foco especificamente para a Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro e adaptado às condições semiáridas, que abriga cerca de 32 milhões de pessoas (Brasil, 2024), cuja subsistência e bem-estar estão, em grande medida, atrelados aos recursos naturais locais. A relação entre as populações humanas e o ambiente na Caatinga configura um socioecossistema complexo, onde as estratégias de vida se adaptaram secularmente às condições de semiaridez e à sazonalidade climática (Albuquerque; Melo, 2018).

A Caatinga, apesar de sua singularidade e importância ecológica, enfrenta um histórico de degradação associado à exploração de seus recursos para fins energéticos (lenha e carvão vegetal), à expansão da pecuária extensiva, principalmente caprina, e à agricultura de sequeiro, muitas vezes praticada em bases pouco sustentáveis, o que intensifica a vulnerabilidade intrínseca desse socioecossistema às variações climáticas, sobretudo aos eventos de seca prolongada (Albuquerque; Melo, 2018).

Nesse contexto, a remoção da cobertura vegetal nativa na Caatinga contribui diretamente para a intensificação dos processos de desertificação³, um dos mais graves problemas ambientais e sociais do semiárido brasileiro,

³ Conceitua-se como processo de degradação da terra nas regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultante de vários fatores, inclusive variações climáticas e atividades humanas. Caracteriza-se pela perda da capacidade produtiva do solo, redução da cobertura vegetal e escassez de água, de modo a afetar severamente o meio ambiente e as populações locais.

o que ocasiona a perda de solo por erosão e a redução da capacidade de infiltração de água e compromete a produtividade agrícola e pecuária, bases econômicas para milhões de famílias na região.

De igual modo, a diminuição da oferta de forragem nativa e a escassez hídrica agravada pelo desmatamento impactam severamente a caprinocultura e a ovinocultura, atividades tradicionais e de grande relevância cultural e econômica para incontáveis famílias. É a crônica de uma tragédia anunciada, repetida em tantas paisagens degradadas pelo mundo.

Conforme aponta Humberto Barbosa, coordenador do Laboratório de Processamento de Imagem de Satélites – Lapis, em entrevista ao Instituto Humanitas Unisinos – IHU em 2017, a desertificação, alimentada pelo desflorestamento e pelo manejo inadequado da terra, resulta na perda progressiva da capacidade produtiva do solo, com consequências diretas como a pobreza, a migração e a insegurança alimentar (Barbosa, 2017). Estima-se que cerca de 70% da Caatinga no estado da Paraíba já se encontre degradada, de modo a afetar diretamente o comércio local e regional e a situação econômica de grupos de agricultores familiares (Barbosa, 2017).

A extração ilegal de lenha e a produção de carvão vegetal, frequentemente associadas ao desmatamento, conquanto representem uma fonte de renda para populações em situação de vulnerabilidade, perpetuam um ciclo de degradação ambiental e pobreza. Além disso, a madeira da Caatinga ainda supre uma parcela significativa da demanda energética de polos industriais, como os gesseiros e ceramistas, contudo, muitas vezes, à custa da ilegalidade e da exploração insustentável (Brasil, 2024).

Essa pressão sobre os recursos florestais não apenas acelera o desmatamento, mas também priva as comunidades locais de recursos essenciais para seu próprio uso, como madeira para construção, cercas e utensílios, além de plantas medicinais e alimentícias, o que impacta diretamente no bem-estar e na segurança das famílias, aprofunda a vulnerabilidade de um povo já acostumado a lidar com a incerteza climática, e aumenta sua dependência de mercados externos e sua vulnerabilidade a choques econômicos.

Ademais, o desmatamento ilegal na Caatinga fragmenta paisagens e ecossistemas, o que compromete a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos associados. A redução da diversidade biológica também representa a perda de um capital genético de valor inestimável, com potencial ainda largamente inexplorado para a bioprospecção e o desenvolvimento de novos produtos farmacêuticos, cosméticos e alimentícios, de modo que impede o desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis baseadas na sociobiodiversidade da Caatinga, que poderiam gerar renda e oportunidades para as comunidades locais, ao mesmo tempo em que promoveriam a conservação (Albuquerque; Melo, 2018).

Com efeito, um ciclo vicioso e perverso se forma: a degradação gera pobreza, e a pobreza, por falta de alternativas, muitas vezes força a continuidade da exploração insustentável dos recursos que restam. Consequentemente, a inexorável perda dos meios de produção e a insegurança alimentar acabam por estimular a migração para centros urbanos ou outras regiões, muitas vezes em condições precárias (Barbosa, 2017), o que esvazia o campo, sobrecarrega as cidades e, fatalmente, gera novos problemas sociais.

Para aqueles que permanecem, frequentemente os mais vulneráveis, o que lhes sobra é enfrentar condições de vida cada vez mais difíceis, com acesso limitado a serviços básicos e maior exposição aos riscos climáticos e ambientais. Um reflexo direto disso é a baixa densidade demográfica registrada em alguns núcleos de desertificação na Paraíba (Barbosa, 2017).

A dimensão cultural também é afetada, porquanto a perda de paisagens, espécies e práticas tradicionais associadas ao bioma representa uma erosão da identidade cultural das comunidades catingueiras, de sorte que o conhecimento ecológico local, acumulado ao longo de gerações de convivência com o semiárido, corre o risco de se perder junto com a degradação do ambiente que o sustenta (Albuquerque; Melo, 2018).

Fica evidente, portanto, que o desmatamento ilegal na Caatinga não é apenas uma questão ambiental, mas uma crise socioeconômica com implicações profundas para milhões de brasileiros, o que perpetua ciclos de pobreza, agrava a vulnerabilidade a eventos climáticos extremos

e compromete o desenvolvimento sustentável da região. Em suma, a Caatinga desmatada é também uma Caatinga silenciada em sua riqueza natural, social e cultural.

Romper esse ciclo vicioso exige políticas públicas integradas que promovam a conservação ambiental concomitantemente com o desenvolvimento social e econômico, a valorização do conhecimento tradicional e o fortalecimento da governança local.

Nesse contexto, a responsabilidade pela promoção de um futuro mais justo e ecologicamente equilibrado não recai exclusivamente sobre o Poder Público. De fato, “as empresas têm seu papel essencial na promoção do desenvolvimento e na redução das desigualdades sociais, mas, para a atuação empresarial, tem-se a proteção do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade ambiental como condicionador para o desenvolvimento das corporações” (Pompeu; Holanda, 2023, p. 140).

Essa perspectiva sobre a responsabilidade dos atores econômicos dialoga com a crítica mais ampla aos sistemas que perpetuam a desigualdade. Como adverte Muhammad Yunus (2023, p. 54), “é importante partir do entendimento de que a pobreza não é criada pelos pobres. Ela surge de um sistema econômico cujos recursos tendem a ir para o topo, criando um cogumelo de riqueza em constante expansão, controlado por 1% das pessoas”, muitas vezes à custa da degradação ambiental e da exclusão social, fenômeno observado tanto no contexto geral dos biomas quanto no específico da Caatinga.

O combate ao desmatamento ilegal, portanto, não se trata apenas de proteger árvores; mas também de proteger pessoas, garantir segurança alimentar e hídrica, e abrir caminho para um desenvolvimento que respeite os limites e as potencialidades desse bioma singular e de seu povo resiliente, com o propósito de valorizar sua sociobiodiversidade e assegurar um futuro digno para quem nela vive e dela depende.

3. MECANISMOS DE COMBATE AO DESMATAMENTO ILEGAL E O AUXÍLIO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O combate ao desmatamento ilegal é um desafio complexo que exige a combinação de diferentes estratégias e instrumentos, desde o monitoramento e a fiscalização até o fomento a atividades produtivas sustentáveis e a responsabilização dos infratores. No Brasil, diversas iniciativas têm sido implementadas para enfrentar esse problema, tanto em nível nacional quanto regional, com o objetivo de proteger os biomas e promover o uso sustentável dos recursos naturais.

Entre os principais mecanismos de combate ao desmatamento ilegal, nos biomas em geral, destacam-se o monitoramento por satélite, realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio de projetos como o PRODES e o DETER, que permite identificar áreas desmatadas e acompanhar a evolução do desmatamento em tempo real; a fiscalização ambiental, através de órgãos ambientais, como o IBAMA e as secretarias estaduais de meio ambiente, que visa coibir o desmatamento ilegal e aplicar as sanções previstas em lei; a criação e gestão de unidades de conservação, que protegem áreas de relevante importância ecológica; o fomento a atividades produtivas sustentáveis, que oferecem alternativas econômicas para as comunidades locais; e a responsabilização dos infratores, que busca garantir que aqueles que cometem crimes ambientais sejam punidos de acordo com a lei.

Nesse contexto, a Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei nº 12.651/2012), conhecida como Código Florestal, institui normas gerais sobre o uso e a conservação da vegetação nativa no Brasil. A lei define as áreas de preservação permanente (APPs) e as áreas de reserva legal (RL), estabelece as regras para a exploração da vegetação nativa e prevê instrumentos como o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e o Programa de Regularização Ambiental (PRA) (Brasil, 2012).

Com efeito, o artigo 1º-A da referida lei dispõe que:

Art. 1º-A. Esta Lei estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos

florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos.

Para os biomas brasileiros (inclusive a Caatinga), com exceção da Amazônia Legal, a Lei de Proteção da Vegetação nativa estabelece a obrigatoriedade de manter uma área com cobertura de vegetação nativa, a título de Reserva Legal, de, no mínimo, 20% (vinte por cento) da área total do imóvel rural (art. 12), a depender da localização e do bioma, bem como as suas respectivas restrições de uso, salvo os casos previstos no art. 67 da Lei, *in verbis*:

Art. 67. Nos imóveis rurais que detinham, em 22 de julho de 2008, área de até 4 (quatro) módulos fiscais e que possuam remanescente de vegetação nativa em percentuais inferiores ao previsto no art. 12, a Reserva Legal será constituída com a área ocupada com a vegetação nativa existente em 22 de julho de 2008, vedadas novas conversões para uso alternativo do solo.

Como principal instrumento para a implantação do Código Florestal, há o Cadastro Ambiental Rural (CAR), um registro eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais, que tem como objetivo identificar e mapear as APPs, as RLs e as áreas de uso restrito existentes no imóvel, de modo a integrar as informações ambientais de propriedades e posses rurais, e, assim, garantir a regularização fundiária e a segurança jurídica de propriedade rurais e evitar conflitos fundiários. Nesse ponto, utiliza-se o Sistema Nacional de Cadastro Ambiental (Sicar) como base de dados digital para facilitar o registro e acesso ao CAR.

Com o intuito de integrar o referido sistema com políticas públicas diversas e consolidar informações geoespaciais no governo, o Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos (MGI) se tornou responsável pela infraestrutura tecnológica e a base de dados do Sicar com o advento da Lei nº 14.600/2023. De igual modo, todas as Unidades da Federação devem estar integradas ao Sicar para envio ou utilização do sistema, ainda que através de sistema próprios. Contudo, há dificuldades na realização dessa integração de maneira adequada, porquanto a carência de recursos tecnológicos, financeiros e humanos, bem como o próprio sistema Sicar necessita de melhorias com a finalidade de aprimorar a automatização da

análise de registros e auxiliar no monitoramento da implementação do Código Florestal (Brasil, 2024, p. 77).

Nesse sentido, a análise da atuação estatal em políticas ambientais correlatas, como a gestão do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC), conhecido por “Fundo Clima”, revela que, conforme entendimento destacado por Pinheiro e Pompeu (2024, p. 84) ao citar o relator da ADPF 708, Ministro Luís Roberto Barroso, “a tutela ambiental, inclusive em sua dimensão climática, não se insere em juízo político, de conveniência e oportunidade, do Chefe do Executivo. Ao contrário, ‘trata-se de obrigação cujo cumprimento está vinculado’”. A efetividade de instrumentos como o Sicar, portanto, não depende apenas de aperfeiçoamentos tecnológicos, mas de uma vinculação administrativa robusta aos ditames constitucionais de proteção ambiental.

Já o Programa de Regularização Ambiental (PRA), implementado pelo Decreto Federal 7.830/2012, compreende o conjunto de ações ou iniciativas que visam à regularização da situação ambiental dos imóveis rurais, inscritos no CAR, que não cumprem as exigências do Código Florestal, com a promoção de benefícios àqueles que se comprometerem em recuperar as áreas degradadas ou alteradas, como a suspensão de sanções decorrentes de infrações relativas à supressão irregular de vegetação ocorrida.

Além do Código Florestal, outras leis e políticas públicas também contribuem para o combate ao desmatamento ilegal, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e Queimadas no Cerrado (PPCerrado) e, no caso específico da Caatinga, o Plano de Ação Para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Caatinga (PPCaatinga), entre outros.

Os instrumentos econômicos também desempenham um papel importante no combate ao desmatamento, ao incentivar a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais. A Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), instituída pela Lei nº 14.119/2021, é um exemplo de mecanismo que busca recompensar proprietários rurais

e comunidades tradicionais por ações de preservação e recuperação ambiental.

Nas palavras de Carlos Sérgio Gurgel da Silva (2021):

A lei em comento trouxe uma inovação marcante, ao definir conceitos que são muito úteis ao direito ambiental brasileiro. [...] o ponto central da discussão repousa na definição do que seriam serviços ambientais, que é definido no inciso III desse mesmo artigo 2º da lei como sendo as atividades individuais ou coletivas que favorecem a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos. [...] A lei também é clara ao definir pagamento por serviço ambiental todas as transações de natureza voluntária, mediante a qual um pagador de serviços ambientais transfere a um provedor desses serviços recursos financeiros ou outra forma de remuneração, nas condições acertadas, respeitadas as disposições legais e regulamentares pertinentes.

No entanto, a efetividade desses instrumentos depende de um sistema de monitoramento e fiscalização eficiente. Nesse contexto, nos últimos anos, a inteligência artificial (IA) tem se mostrado uma ferramenta promissora para auxiliar no combate ao desmatamento ilegal, ao oferecer a capacidade de analisar grandes volumes de dados de diferentes fontes, como imagens de satélite, dados de sensoriamento remoto e informações de campo; identificar padrões; prever áreas de risco com maior precisão e agilidade; e gerar alertas de forma mais rápida e precisa. Nesse contexto, a IA pode ser utilizada em diversas etapas do processo de combate ao desmatamento, desde o monitoramento e a fiscalização até a análise de risco e a previsão de áreas críticas (Schuller et al. 2024).

No monitoramento, a IA pode ser utilizada para analisar imagens de satélite e identificar áreas desmatadas com maior rapidez e precisão do que os métodos tradicionais. Algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*)⁴ podem ser treinados para reconhecer padrões de desmatamento e identificar áreas de risco com base em dados históricos e variáveis ambientais.

⁴ Refere-se a subcampo da inteligência artificial que se concentra no desenvolvimento de algoritmos que permitem aos sistemas computacionais aprenderem a partir de dados, sem serem explicitamente programados para cada tarefa. No contexto do monitoramento ambiental, algoritmos de aprendizado de máquina podem ser treinados para identificar padrões em imagens de satélite que indiquem desmatamento, queimadas ou outras alterações na cobertura vegetal.

Nessa linha, o Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), em parceria com o Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), desenvolveu algoritmo de IA que auxilia na detecção de desmatamento na Amazônia, que utiliza tecnologia de redes neurais, analisa imagens de satélite para identificar áreas desmatadas com alta precisão, o que representa uma economia de tempo de 30% (trinta por cento) no trabalho dos especialistas (Imazon, 2024).

De igual modo, a tecnologia também tem sido utilizada para prever o risco de desmatamento em áreas prioritárias a exemplo da plataforma PrevisIA, desenvolvida pelo Imazon em parceria com a Microsoft e o Fundo Vale, a qual emprega algoritmo de IA para detectar estradas clandestinas e, com base nisso e em outras variáveis, prever áreas de alto risco de desmatamento, tendo assertividade média de 73% (setenta e três por cento). Isso permite que ações preventivas sejam direcionadas para áreas com maior risco, de modo a otimizar os esforços de fiscalização e controle (Climainfo, 2024).

A participação de comunidades tradicionais e povos indígenas também tem sido fundamental para o sucesso das ações de combate ao desmatamento ilegal. O conhecimento tradicional sobre o uso e a conservação dos recursos naturais pode complementar o monitoramento por satélite e a IA, além de fortalecer a governança territorial e a proteção das florestas. No Acre, por exemplo, agentes indígenas utilizam drones e GPS para monitorar seus territórios e combater o desmatamento (Ennes; Chaves, 2021).

De outro giro, na fiscalização, a IA pode ser utilizada para cruzar dados de diferentes fontes, como o CAR, as autorizações de desmatamento e os registros de ocorrências ambientais, a fim de identificar inconsistências e irregularidades. Essa tecnologia também pode ser utilizada para analisar dados de sensoriamento remoto e identificar atividades ilegais, como a extração ilegal de madeira e a mineração clandestina.

Já na análise de risco, a IA pode ser utilizada para identificar áreas com maior probabilidade de ocorrência de desmatamento ilegal, com base em dados históricos, variáveis ambientais e fatores socioeconômicos, o que

pode ser utilizado para direcionar as ações de fiscalização e prevenção, de forma a proteger as áreas mais vulneráveis.

Apesar do potencial da IA, é importante reconhecer que sua aplicação, máxime no contexto do combate ao desmatamento ilegal, ainda é incipiente e enfrenta desafios. Um dos principais é a disponibilidade e a qualidade dos dados, que muitas vezes são escassos, desatualizados ou inconsistentes, o que impede a IA realizar a devida análise sem um extrato de dados suficiente para o efetivo treinamento dos algoritmos.

Outro desafio é a necessidade de desenvolver algoritmos de aprendizado de máquina que sejam capazes de lidar com a complexidade dos ecossistemas e com a diversidade de padrões de desmatamento. Adicionalmente, a questão orçamentária para a implementação e utilização de IA no monitoramento ambiental transcende o custo de aquisição de um software. Os principais investimentos residem na aquisição contínua de imagens de satélite de alta resolução, no estabelecimento de infraestrutura tecnológica robusta (preferencialmente em nuvem, como na PrevisIA), no financiamento de pesquisa e desenvolvimento (P&D) para modelos específicos e na capacitação de recursos humanos (World Bank, 2020).

Além disso, é fundamental garantir que a utilização dessa inovação seja acompanhada de medidas de proteção de dados e de respeito aos direitos das comunidades locais, haja vista que a IA não deve ser utilizada para criminalizar ou marginalizar as comunidades tradicionais, mas sim para fortalecer a proteção dos seus territórios e promover o uso sustentável dos recursos naturais.

Portanto, a utilização de IA no combate ao desmatamento ilegal, ainda que incipiente, já apresenta resultados promissores. O avanço de seu sucesso deve estar atrelado à combinação de diferentes mecanismos de combate ao desmatamento, desde o uso e aperfeiçoamento da própria tecnologia, até o fortalecimento da legislação, os instrumentos econômicos e a participação social, de sorte a garantir a proteção dos biomas brasileiros e a promoção do desenvolvimento sustentável.

Com efeito, Pinheiro e Pompeu (2024, p. 86), ao mencionarem o Supremo Tribunal Federal (STF), ressaltam a especial proeminência do princípio da vedação do retrocesso na proteção ambiental. Conforme os

autores, esse princípio é violado quando há diminuição do nível de proteção ambiental por inação estatal ou pela supressão de políticas públicas relevantes sem a devida substituição por outras igualmente adequadas. Assim, a introdução da IA deve ser vista como um fortalecimento do aparato de proteção, e não como uma solução que opera isolada dos deveres estatais preexistentes de garantir a efetividade das políticas ambientais.

Afinal, como salienta Muhammad Yunus (2023, p. 153), é fundamental recordar que a tecnologia, por si só, não possui arbítrio. Ela é uma ferramenta concebida para um propósito determinado pelos seres humanos, que decidem tanto os fins para os quais a tecnologia é criada quanto a maneira como ela pode ser adaptada para outras finalidades. Portanto, a eficácia da IA no combate ao desmatamento na Caatinga dependerá crucialmente de como seus objetivos são definidos e integrados a um arcabouço mais amplo de políticas e ações.

4. PLANOS E MECANISMOS DE COMBATE AO DESMATAMENTO ILEGAL E O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO BIOMA CAATINGA

O enfrentamento do desmatamento ilegal na Caatinga tem sido objeto de diversas iniciativas e planos de ação governamentais e não governamentais, que buscam conciliar o desenvolvimento socioeconômico da região com a conservação de sua biodiversidade única. Nesse sentido, em dezembro de 2023, o Governo Federal instituiu o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Caatinga (PPCaatinga), com vigência de 2024 a 2027, o qual estabelece um conjunto de objetivos, metas e ações estratégicas para reduzir o desmatamento e as queimadas no bioma, bem como abrange eixos como o fortalecimento da governança fundiária e territorial, o monitoramento e fiscalização ambiental, o fomento a atividades produtivas sustentáveis e a recuperação de áreas degradadas (Brasil, 2024).

Entre as ações previstas no PPCaatinga, destacam-se o aprimoramento do Sistema Nacional de Informações Florestais (Sinaflor) para integrar dados de autorizações de supressão de vegetação, o fortalecimento da fiscalização ambiental com o uso de tecnologias e inteligência, o apoio à regularização

fundiária de territórios quilombolas e de povos e comunidades tradicionais, e o incentivo a práticas agropecuárias e florestais sustentáveis.

O plano se estrutura em quatro eixos temáticos: atividades produtivas sustentáveis, que visa promover alternativas econômicas que privilegiam o uso sustentável dos recursos naturais, como a sociobioeconomia, o manejo florestal sustentável e a recuperação de áreas desmatadas ou degradadas. Inclui também o estímulo a atividades agropecuárias eficientes e sustentáveis, baseadas na convivência com o semiárido; monitoramento e controle, que busca fortalecer a atuação das instituições federais e aprimorar a capacidade de controle, prevenção, análise e monitoramento do desmatamento, da degradação e das cadeias produtivas; ordenamento fundiário e territorial, o qual tem como objetivo adequar e orientar a destinação das terras e o seu uso, minimizar os impactos de grandes empreendimentos e potencializar os instrumentos legais existentes para promoção do uso sustentável e redução do desmatamento; e instrumentos normativos e econômicos, que visa criar, aperfeiçoar e implementar instrumentos normativos e econômicos para o controle do desmatamento e das queimadas e a conservação da biodiversidade (Brasil, 2024, p. 68-83). Cada eixo temático estabelece objetivos estratégicos, resultados esperados, linhas de ação, metas e indicadores, com o objetivo de orientar as ações dos diferentes atores envolvidos na implementação do plano.

Entre as ações previstas no PPCaatinga para consecução de seus objetivos, destacam-se o fortalecimento do monitoramento e da fiscalização ambiental, a promoção do manejo florestal sustentável, o apoio à recuperação de áreas degradadas, o fomento a atividades agropecuárias sustentáveis e a criação de instrumentos econômicos para a conservação da biodiversidade. A articulação entre diferentes órgãos governamentais, a participação da sociedade civil e a agregação do conhecimento científico e tradicional são consideradas elementos cruciais para o sucesso do plano.

Além do PPCaatinga, outras iniciativas visam a proteção e a recuperação da Caatinga. A Comissão de Meio Ambiente (CMA) do Senado Federal aprovou, em dezembro de 2024, um projeto de lei que cria a Política Nacional para a Recuperação da Vegetação da Caatinga. Esta política tem como objetivos principais incentivar a recuperação de

áreas degradadas, ampliar a produção sustentável de alimentos, contribuir para a segurança hídrica e estimular a bioeconomia na região. A proposta prevê instrumentos como a capacitação de recursos humanos, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico, a elaboração de planos de ação para prevenção ao desmatamento e o combate à desertificação (Brasil, 2024).

Apesar dessas iniciativas, a efetividade do combate ao desmatamento ilegal no bioma Caatinga depende crucialmente da incorporação de tecnologias avançadas que permitam um monitoramento mais eficiente e uma fiscalização mais assertiva. Nesse contexto, o uso do geoprocessamento e do sensoriamento remoto⁵ já representa uma ferramenta valiosa para o mapeamento e a análise da cobertura vegetal, de maneira a possibilitar a identificação de áreas desmatadas e o acompanhamento da evolução do desmatamento ao longo do tempo (Asner et al., 2005).

Conforme estudo de Ramos et al, (2015), o uso de geoprocessamento e de sensoriamento remoto na região da Caatinga, mais especificamente no município de Dormentes, semiárido do estado de Pernambuco, utilizou imagens dos satélites Landsat 5 e 8 para gerar mapas que retratam o processo de desmatamento na área estudada, com o auxílio do software ArcGis 10.2 (SERGEO – UFPE), e evidenciou o avanço das áreas desmatadas naquele município em 27 (vinte e sete) anos, com o aumento de 27% da área desmatada em 1987 para 55% em 2014, de sorte que é uma ferramenta de importância para o subsídio de ações de controle.

De igual modo, a colaboração entre instituições de pesquisa, órgãos ambientais e prefeituras também tem impulsionado o uso de tecnologias para o monitoramento da Caatinga. Em fevereiro de 2025, o Ibama e a prefeitura de Caicó (RN) uniram forças para fortalecer a fiscalização ambiental na região do Seridó potiguar, de modo a buscar soluções para o enfrentamento da desertificação e do desmatamento (Ibama, 2025).

Além disso, a inteligência artificial (IA) surge como um catalisador para potencializar ainda mais as capacidades do geoprocessamento e do sensoriamento remoto no combate ao desmatamento na Caatinga. Embora

⁵ O sensoriamento remoto é a tecnologia de aquisição de informações sobre um objeto ou fenômeno sem que haja contato físico com ele, tipicamente por meio de sensores instalados em satélites ou aeronaves. O geoprocessamento, por sua vez, envolve o tratamento e a análise de dados geograficamente referenciados, como os obtidos pelo sensoriamento remoto, para gerar mapas, modelos e informações que auxiliem na compreensão e gestão do território.

sua aplicação em larga escala no bioma ainda seja incipiente, o potencial para monitoramento, previsão e fiscalização é vasto. A título de exemplo, o sistema MapBiomas Alerta, que utiliza algoritmo de aprendizagem de máquina para identificar e alertar sobre desmatamento em todos os biomas brasileiros, inclusive a Caatinga, já demonstra a viabilidade da aplicação dessa tecnologia (MapBiomas Alerta, [s. d.]).

Para compreender o potencial da IA na Caatinga, é importante revisitar as características do processo de desmatamento nesse bioma. Em síntese, historicamente, a ocupação da Caatinga e o consequente desmatamento estão intrinsecamente ligados à introdução da pecuária extensiva e da agricultura de subsistência, o que, em conjunto com a extração de lenha e a produção de carvão vegetal, continuam a ser vetores importantes do desmatamento. Essa dinâmica complexa exige ferramentas de monitoramento capazes de identificar não apenas o desmatamento em si, mas também as atividades associadas a ele.

Nesse sentido, a IA pode ser utilizada para analisar séries temporais de imagens de satélite⁶ com maior precisão e identificar padrões de desmatamento que podem estar relacionados a diferentes tipos de atividades ilegais. Algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) podem ser treinados para reconhecer características específicas de áreas desmatadas para pastagem, agricultura ou exploração madeireira, a permitir uma identificação mais detalhada das causas do desmatamento (SCHULLER, Rodrigo et al., 2024).

Ademais, a IA pode auxiliar na avaliação de pastagens degradadas, uma consequência comum do desmatamento na Caatinga. Segundo estudo de campo Simões et al. (2023, p. 4644), a análise de imagens de satélite e até mesmo de fotografias de *smartphones*, com a utilização de técnicas de aprendizado profundo (*deep learning*)⁷ e aprendizado de máquina (*machine learning*), pode fornecer informações valiosas sobre o estado

⁶ Consiste em um conjunto de imagens da mesma área geográfica, adquiridas em diferentes datas ao longo do tempo. A análise dessas séries permite monitorar mudanças na superfície terrestre, como o avanço do desmatamento, a regeneração de florestas, a expansão urbana, o comportamento de corpos d'água e o desenvolvimento de culturas agrícolas, de modo a fornecer informações cruciais para estudos ambientais e planejamento.

⁷ Aprendizado profundo (do inglês, *deep learning*) é uma especialização dentro do aprendizado de máquina que utiliza redes neurais artificiais com múltiplas camadas (daí o termo “profundo”) para modelar e entender padrões complexos em grandes volumes de dados. É particularmente eficaz em tarefas como reconhecimento de imagem, processamento de linguagem natural e detecção de objetos, sendo uma ferramenta poderosa para analisar imagens de satélite e fotografias na identificação de mudanças ambientais.

de conservação das pastagens e subsidiar ações de recuperação de áreas degradadas. Sugere-se, segundo a pesquisa, duas soluções:

[...] a primeira baseia-se no uso de técnicas de inteligência artificial, mais especificamente *deep learning* através do modelo deeplabv3+ para a obtenção de diagnóstico de degradação de pastagem via câmera de celular (smartphone), em uma abordagem local, ou seja, a nível de parcela/gleba, visando subsidiar a tomada de decisão do proprietário rural. A segunda utiliza imagens de sensores remotos orbitais (satélite) e algoritmo de *machine learning* para classificar a degradação de pastagem a nível regional, com enfoque no tomador de decisão a nível governamental. Nesta abordagem, buscou-se analisar abordagens inovadoras no campo do Sensoriamento Remoto e na integração de dados espaciais, se baseando em metodologias para detectar sistemas de produção agrícola alinhados aos princípios da agricultura com baixa emissão de carbono (BRASIL, 2012; KUCHLER et al., 2019, 2022)

Como resultados desse estudo, o qual teve como área objeto a cidade de Valença/RJ, a abordagem com *deep learning*, com a utilização do modelo DeepLabV3+⁸, alcançou uma assertividade de 95,9% (noventa e cinco vírgula nove por cento) para diagnósticos locais através do uso de smartphones. De outro lado, a abordagem com *machine learning* e satélites, com a utilização do algoritmo Random Forest⁹, alcançou, igualmente, 95,9% (noventa e cinco vírgula nove por cento) de precisão para avaliações regionais, o que é particularmente relevante para uma futura abordagem na Caatinga, onde a desertificação e a degradação do solo representam sérias ameaças.

De outro giro, a experiência da aplicação de IA para a previsão de desmatamento na Amazônia oferece *insights* valiosos para a Caatinga. Técnicas de IA, como redes neurais artificiais¹⁰ e modelos de aprendizado

8 Trata-se de modelo de rede neural convolucional de última geração projetado para tarefas de segmentação semântica de imagens. Segmentação semântica é o processo de classificar cada pixel de uma imagem a uma determinada classe (por exemplo, solo, vegetação, água, área degradada). Este modelo é conhecido por sua alta precisão na delimitação de objetos e regiões em imagens, sendo útil para análises detalhadas de cobertura do solo a partir de fotografias ou imagens de satélite.

9 Refere-se a algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado versátil e amplamente utilizado tanto para tarefas de classificação quanto de regressão. Ele opera com a construção de múltiplas árvores de decisão durante o treinamento e emite a classe, que é o modo das classes (classificação) ou a previsão média (regressão) das árvores individuais. É conhecido por sua robustez, bom desempenho com grandes volumes de dados e capacidade de lidar com dados faltantes.

10 Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos computacionais inspirados na estrutura e funcionamento do cére-

de máquina, têm sido utilizadas para analisar diversos fatores, como histórico de desmatamento, dados socioeconômicos, informações de infraestrutura e variáveis ambientais, com o objetivo de prever áreas com maior probabilidade de desmatamento futuro (Fernandes; Osses; Façanha, 2023). A adaptação dessas técnicas para a realidade da Caatinga, consideradas suas características biofísicas e socioeconômicas específicas, pode ser fundamental para o planejamento de ações preventivas e para o direcionamento de recursos de fiscalização.

No entanto, a aplicação efetiva da tecnologia no combate ao desmatamento no bioma enfrenta desafios significativos. A Caatinga possui uma dinâmica de vegetação sazonal e uma heterogeneidade espacial que podem dificultar a generalização de modelos de IA desenvolvidos para outros biomas. A disponibilidade de dados de alta qualidade e com resolução temporal adequada para o treinamento de algoritmos específicos para o bioma Caatinga é outro ponto crucial, além do fato de que a infraestrutura tecnológica e a capacitação de recursos humanos para o desenvolvimento e a utilização dessas ferramentas de IA ainda precisam ser aprimoradas na região.

Com efeito, a superação desses desafios técnicos e operacionais para a plena aplicação da IA na Caatinga está intrinsecamente ligada à existência de um ambiente propício à inovação e à ação efetiva. Nessa esteira, Muhammad Yunus (2023, p. 123), ao abordar os elementos essenciais para a construção de uma sociedade funcional que respeite a boa governança e os direitos humanos, destaca a importância de uma estrutura política e social que minimize a corrupção, a injustiça e o surgimento de regimes tirânicos, de maneira a assegurar o respeito aos direitos de todas as pessoas, como o que ele chama de “terceiro megapoder”, crucial para criar o novo sistema econômico que garantirá a sobrevivência e a prosperidade humanas. De fato, em um contexto disfuncional, sem uma boa governança e um sistema que apoie a implementação de soluções, mesmo as tecnologias mais avançadas podem ter seu potencial limitado.

bro humano. Consistem em unidades de processamento interconectadas (neurônios artificiais) organizadas em camadas. As RNAs aprendem a partir de dados e ajustam as forças das conexões (pesos) entre os neurônios, de modo a permitir-lhes reconhecer padrões complexos, classificar dados e fazer previsões. São a base de muitas técnicas de aprendizado profundo.

Apesar desses desafios, a capacidade transformadora da IA para o combate ao desmatamento ilegal na Caatinga é inegável. A combinação da capacidade de processamento e análise de grandes volumes de dados com a identificação de padrões complexos e a geração de alertas em tempo real pode otimizar significativamente as ações de monitoramento e fiscalização, com a priorização de áreas de atuação, a identificação de atividades ilegais em curso e a previsão de riscos futuros, de sorte a permitir uma atuação mais proativa e eficiente dos órgãos ambientais.

Desse modo, quanto o vasto potencial da tecnologia em questão, é importante reconhecer que ainda há um longo caminho a percorrer. É fato que para a aplicação na Caatinga ocorrer de forma efetiva, ainda são necessários investimentos em pesquisa e desenvolvimento na adaptação de tecnologias existentes e na capacitação de técnicos e órgãos ambientais, de modo que a aplicação da IA no bioma ainda não atingiu sua plena potencialidade. Os planos e políticas existentes fornecem um arcabouço importante, mas sua efetividade depende da incorporação de tecnologias inovadoras e de investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e capacitação.

Portanto, para que o combate ao desmatamento ilegal na Caatinga se torne mais eficaz, é fundamental uma abordagem multifacetada, que combine o investimento em pesquisa e desenvolvimento de soluções de IA adaptadas às especificidades do bioma, o aprimoramento da infraestrutura de dados e tecnológica, a capacitação de profissionais e a promoção da colaboração entre instituições de pesquisa, órgãos governamentais e a sociedade civil. A integração da inteligência artificial com as estratégias existentes de monitoramento e fiscalização representa um caminho promissor para a proteção desse bioma único e essencial para o equilíbrio ambiental do semiárido brasileiro.

CONCLUSÃO

A persistente problemática do desmatamento na Caatinga, impulsionada por diversas causas, revela uma crise complexa com impactos ambientais e socioeconômicos profundamente interligados. A perda de vegetação nativa não apenas compromete a biodiversidade e os serviços

ecossistêmicos essenciais, como a regulação hídrica e a fertilidade do solo, mas também agrava a vulnerabilidade das populações locais, intensifica a pobreza, a insegurança alimentar e acelera processos de desertificação, de maneira que mina as bases de subsistência e a resiliência das comunidades catingueiras.

Esse cenário clama por soluções inovadoras e eficientes para seu monitoramento, controle e, em última instância, sua prevenção. A análise integrada do potencial da Inteligência Artificial, com outras tecnologias como o Geoprocessamento e o Sensoriamento Remoto, revela um caminho promissor para aprimorar substancialmente a compreensão da dinâmica do desmatamento e para a implementação de ações mais direcionadas e eficazes, apesar dos desafios inerentes à sua implementação específica na Caatinga, como custos, necessidade de dados adaptados e capacitação técnica.

O Sensoriamento Remoto, com sua capacidade de fornecer dados espaciais e temporais abrangentes da cobertura vegetal da Caatinga, constitui a base fundamental para o monitoramento. As imagens de satélite, analisadas em séries históricas, permitem quantificar a perda de vegetação nativa, identificar padrões espaciais de desmatamento e delimitar áreas de maior vulnerabilidade.

O Geoprocessamento, por sua vez, oferece as ferramentas essenciais para o tratamento, a análise espacial e a visualização desses dados, de modo a integrá-los com outras informações geográficas relevantes, como infraestrutura viária, hidrografia e a distribuição de áreas protegidas e propriedades rurais, o que possibilita identificar possíveis vetores e condicionantes do desmatamento e auxilia na formulação de hipóteses sobre suas causas e na identificação de áreas prioritárias para intervenção.

De outro giro, a Inteligência Artificial emerge como um catalisador na análise desse vasto conjunto de dados, ao oferecer técnicas avançadas de aprendizado de máquina e aprendizado profundo capazes de automatizar a classificação de imagens com alta acurácia, identificar padrões complexos e, crucialmente, prever a probabilidade de ocorrência de desmatamento futuro. Modelos preditivos treinados com dados históricos de desmatamento, informações geográficas e socioeconômicas podem gerar mapas de risco,

a indicar áreas com maior probabilidade de serem desmatadas em um futuro próximo, de sorte que é fundamental para a atuação preventiva e permite que órgãos de fiscalização e gestão ambiental aloquem recursos de forma mais eficiente e implementem medidas de proteção antes que o desmatamento ocorra.

No contexto do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e Queimadas da Caatinga (PPCaatinga), o uso estratégico dessas tecnologias se alinha diretamente com diversos objetivos e eixos de atuação. O Eixo II, dedicado ao “Monitoramento e controle ambiental”, e o Objetivo Estratégico 7, que busca “Aprimorar os sistemas de monitoramento e alerta de desmatamento e queimadas”, são diretamente beneficiados pela aplicação do Sensoriamento Remoto, do Geoprocessamento e da IA, por quanto a capacidade de qualificar o desmatamento autorizado e não autorizado, acompanhar a execução de autorizações e integrar dados de áreas embargadas, conforme previsto no PPCaatinga, pode ser significativamente aprimorada com o uso de soluções tecnológicas baseadas nessas ferramentas.

Ademais, a IA demonstra potencial para além do monitoramento do desmatamento em si, a estender-se à avaliação da degradação da vegetação nativa e incluir a identificação de áreas de pastagens degradadas. A utilização de algoritmos de *deep learning* e *machine learning* aplicados a imagens de satélite e até mesmo a fotos de *smartphones* oferece metodologias inovadoras e acessíveis para diagnosticar e monitorar a saúde dos ecossistemas da Caatinga em diferentes escalas, o que é essencial para o planejamento de ações de recuperação e restauração, conforme preconizado no Eixo I do PPCaatinga, voltado para “Atividades produtivas sustentáveis” e para a “Recuperação de áreas degradadas e restauração ecológica”, e para informar políticas que abordem as causas socioeconômicas da degradação.

A efetividade da aplicação dessas tecnologias, contudo, depende fundamentalmente da disponibilidade de dados históricos de qualidade e da construção de séries temporais robustas, principalmente aplicado à realidade específica e sazonal da Caatinga. A colaboração entre instituições de pesquisa, órgãos governamentais e a sociedade civil é essencial para

o compartilhamento de dados, o desenvolvimento de metodologias adequadas às especificidades do bioma e a disseminação do conhecimento gerado. Iniciativas como o PRODES e o desenvolvimento de soluções tecnológicas com o emprego de imagens SAR²⁷ são passos importantes nessa direção. Com efeito, a superação dos obstáculos financeiros, de infraestrutura e de recursos humanos especializados é crucial para que a IA possa ser efetivamente empregada.

Em última análise, a adoção e o aprimoramento do uso da Inteligência Artificial, em conjunto com outros mecanismos como o Geoprocessamento e o Sensoriamento Remoto, no contexto da Caatinga representa uma oportunidade crucial para avançar na prevenção e no controle do desmatamento, bem como na recuperação de áreas degradadas. Ao fornecer informações mais precisas, em tempo hábil e em diferentes escalas, essa tecnologia pode subsidiar a formulação e a implementação de políticas públicas mais eficazes, o aprimoramento das ações de fiscalização e a promoção de práticas de uso da terra mais sustentáveis, que considerem a interdependência entre a conservação ambiental e o bem-estar social.

Nessa perspectiva, a promoção da justiça socioambiental e a construção de um futuro sustentável para o bioma Caatinga, potencializadas por essas ferramentas, podem encontrar ancoragem mais sólida no reconhecimento da natureza não apenas como um conjunto de recursos a serem geridos, mas como esfera de valor intrínseco. Com efeito, a transição de um paradigma puramente antropocêntrico para um que contemple os Direitos da Natureza, fundamentada no princípio da integridade ecológica, oferece um alicerce ético-jurídico mais robusto para as políticas de conservação, o que se alinha à necessidade premente de repensar os modelos atuais em busca de um futuro verdadeiramente sustentável.

Portanto, investir no desenvolvimento e na aplicação integrada da Inteligência Artificial, em conjunto com outras tecnologias, é essencial não apenas para a proteção do bioma Caatinga, mas também para a promoção da justiça socioambiental e para a construção de um futuro mais sustentável e equitativo para as comunidades que dependem desse ecossistema único e valioso. A utilização estratégica dessas ferramentas, em consonância com as diretrizes do PPCaatinga e com uma abordagem colaborativa entre os

diversos atores, pode fortalecer a governança ambiental, otimizar a alocação de recursos e, em última instância, contribuir para a efetivação do princípio da reparação integral no contexto mais amplo dos danos ambientais.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino de; MELO, Felipe P. L. A socioecologia da Caatinga: desafios e oportunidades. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 70, n. 4, p. 23-57, 2018. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v70n4/v70n4a12.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2025.

ALENCAR, Kevin. Criação prolongada de gado em modo livre acelera desertificação da caatinga, revela estudo. **Agência UFC**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 3 maio 2022. Disponível em: <<https://agencia.ufc.br/criacao-prolongada-de-gado-em-modo-livre-acelera-desertificacao-da-caatinga-revela-estudo/>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BARBOSA, Humberto. Desertificação da Caatinga gera impactos socioeconômicos. Entrevista concedida a Patricia Fachin. **Instituto Humanitas Unisinos – IHU**. Publicada em 10 abr. 2017. Disponível em: <<https://ihu.unisinos.br/categorias/159-entrevistas/566589-desertificacao-da-caatinga-gera-impactos-socioeconomicos-entrevista-especial-com-humberto-barbosa>>. Acesso em: 04 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 19 jul. 2000. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 10 mar. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas na Caatinga (PPCaatinga)**. Brasília: MMA, 113p, 2024. Disponível em: <[www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/ppcaitinga/ppcaatinga_2024_20_12.pdf](http://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/ppcaatinga/ppcaatinga_2024_20_12.pdf)>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. Senado Federal. CMA aprova política nacional para recuperação da Caatinga; texto vai à Câmara. **Senado Notícias**, Brasília, 11 dez. 2024. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/12/11/cma-aprova-politica-nacional-para-recuperacao-da-caatinga-texto-vai-a-camara>>. Acesso em: 17 mar. 2025.

CARVALHO, Gabriel. Único bioma 100% brasileiro, Caatinga já perdeu 40% de sua área. **ClimaInfo**, 18 abr. 2024. Disponível em: <<https://climainfo.org.br/2024/04/17/unico-bioma-100-brasileiro-caatinga-ja-perdeu-40-de-sua-area/>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

CLIMAINFO. Inteligência artificial identifica risco de desmatamento para 6,5 mil km² na Amazônia em 2025. **ClimaInfo**, Brasília, 17 dez. 2024. Disponível em: <<https://climainfo.org.br/2024/12/17/inteligencia-artificial-identifica-risco-de-desmatamento-para-65-mil-km2-na-amazonia-em-2025/>>. Acesso em: 12 mar. 2025.

ENNES, Juliana; CHAVES, Leandro. Agentes indígenas usam drones e IA para combater o desmatamento na Amazônia. **Mongabay Brasil**, 21 dez. 2021. Disponível em: <<https://brasil.mongabay.com/2021/12/agentes-indigenas-usam-drones-e-ia-para-combater-o-desmatamento-na-amazonia/>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

EVANGELISTA, Antonia dos Reis Salustiano. O processo de desmatamento do bioma Caatinga: riscos e vulnerabilidades socioambientais no território de identidade do Sisal, Bahia. **Revista Geográfica de América Central**, n. 47E, p. 1-6, 2011. Disponível em: <<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2369>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FERNANDES, Bruno J. T.; OSSES, José Roberto; FAÇANHA, Rafael. Avaliação de Técnicas de IA para Auxiliar na Previsão de Incidência de Desmatamento na Amazônia. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 2, p. 57-64,

15 jul. 2022. Disponível em: <<http://revistas.poli.br/index.php/repa/article/view/2218>>. Acesso em: 17 mar. 2025

IMAZON. IMPA e Iamazon desenvolvem IA que identifica desmatamento. Iamazon, Belém, 12 nov. 2024. Disponível em: <<https://amazon.org.br/imprensa/impa-e-amazon-desenvolvem-ia-que-identifica-desmatamento/>>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (Ibama). Para enfrentar desafios ambientais na Caatinga, Ibama e prefeitura unem forças. **Ibama Notícias**, Natal, 27 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2025/para-enfrentar-desafios-ambientais-na-caatinga-ibama-e-prefeitura-unem-forcas>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. PRODES — Coordenação-Geral de Observação da Terra. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MELO, Janieli de Oliveira et al. Caatinga: Um bioma exclusivamente brasileiro. **Ciência & Cultura**, v. 75, n. 4, p. 3, 2023. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v75n4/v75n4a04.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2025.

NO CLIMA DA CAATINGA. Entenda como ocorre o desmatamento na Caatinga. **Site do projeto No Clima da Caatinga**, Fortaleza, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.noclimadacaatinga.org.br/entenda-como-acontece-o-desmatamento-na-caatinga/>>. Acesso em: 10 mar. 2025.

PINHEIRO, Luciana Barreira de Vasconcelos; POMPEU, Gina Vidal Marcílio. Análise constitucional e convencional na ADPF 708 (caso do Fundo Clima): entre o progresso da juridicidade ambiental e o conservadorismo antropocêntrico. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 10, n. 1, p. 75-92, jan./jul. 2024. Disponível em: <<https://indexlaw.org/index.php/revistards/article/view/10518>>. Acesso em: 21 mai. 2025.

POMPEU, Gina Vidal Marcílio; HOLANDA, Marcus Mauricius. A finitude dos recursos naturais e a responsabilidade social das corporações para o futuro sustentável da sociedade. **Revista Magister de Direito Ambiental e Urbanístico**, v. 18, nº 105, p. 125-143, dez./jan. 2023. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/390732419>>. Acesso em: 21 mai. 2025.

PORTO DE LIMA, Maria de Fátima. A desertificação na Caatinga: causas, efeitos e métodos de recuperação ambiental. **Mercator** (Fortaleza), v. 14, n. 1, p. 93-105, jan./abr. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.4215/RM2015.1401.0009>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

Projeto MapBiomas Alerta – Sistema de Validação e Refinamento de Alertas de Desmatamento com Imagens de Alta Resolução. Disponível em: <<https://alerta.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

RAMOS, Marcio José; JUNIOR, Wilson Gonsalves Ferreira; SANTOS, Antonio Marcos dos. USO DO GEOPROCESSAMENTO E DO SENSORIAMENTO REMOTO NO MONITORAMENTO DO DESMATAMENTO DA CAATINGA. In: // **Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido**, 2015, Quixadá. Anais do II Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido. Fortaleza: MASSA, 2015. v. 2. p. 1-7. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B0T02oNLikiuMnRHR05ySURtQW8/view?resourcekey=0-PuDUOmXKD-xlpORjAKOXCA>>. Acesso em: 17 mar. 2025.

RODRIGO, Rodolfo. Cresce desmatamento na Caatinga, bioma mais vulnerável às mudanças climáticas. **Brasil de Fato**, Recife, 9 maio 2023. Disponível em: <<https://www.brasildefato.com.br/2023/05/09/cresce-desmatamento-na-caatinga-bioma-mais-vulneravel-as-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA, Carlos Sérgio Gurgel da. Anotações sobre a Lei nº 14.119/2021, que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. **Jus Navigandi**, 19 jan. 2021. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/88055/anotacoes-sobre-a-lei-n-14-119-2021-que-instituiu-a-politica-nacional-de-pagamento-por-servicos-ambientais>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SCHULLER, Rodrigo et al. Artificial intelligence to support deforestation monitoring in the brazilian amazon. In: **Anais do Simpósio Internacional**

Selper: Além do dossel – Tecnologias e Aplicações de Sensoriamento Remoto.

Anais. Belém (PA) UFPA, 2024. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/xxi-selper-2024/870210-artificial-intelligence-to-support-deforestation-monitoring-in-the-brazilian-amazon/>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SIMÕES, Margareth et al. Inteligência artificial para a avaliação de pastagens degradadas a partir de fotos de smartphones e de series temporais de imagens de satélite: uma abordagem baseada em deep e machine learning para subsidiar o cálculo de indicadores agro-socioambientais. **Caderno Pedagógico**, [S. l.], v. 20, n. 10, p. 4637–4657, 2023. Disponível em: <<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/2103>>.

Acesso em: 17 mar. 2025.

SOUZA, Bartolomeu Israel de; ARTIGAS, Rafael Câmara; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana de. Caatinga e desertificação. **Mercator** (Fortaleza), v. 14, n. 1, p. 131-150, jan./abr. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/mercator/a/zxZxXjPfrx9HjpNj8PLVn4B/>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

TABARELLI, Marcelo; LEAL, Inara R.; SCARANO, Fábio R.; DA SILVA, José M. C. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 70, n. 4, p. 25-29, 1 out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.21800/2317-66602018000400009>>. Acesso em: 20 mar. 2025.

WORLD BANK. Multi-Regional Satellite Monitoring for Forest Management:

Good Practice Guidance Document for Dry Forest Assessment and Monitoring. Washington, DC: World Bank, 2020. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/270931608701855883/txt/Multi-Regional-Satellite-Monitoring-for-Forest-Management-Good-Practice-Guidance-Document-for-Dry-Forest-Assessment-and-Monitoring.txt>>. Acesso em: 22 mai. 2025.

YUNUS, Muhammad; WEBER, Karl. **Um mundo de três zeros:** a nova economia de zero pobreza, zero desemprego e zero emissões líquidas de carbono. Tradução de João Paulo Pimentel. São Paulo: Voo, 2023.