
Franco Perazzoni
chamas de
INJUSTIÇA
Incêndios Florestais,
Saúde e Direitos Humanos
na Amazônia
Núcleo de Estudos Amazônicos
neaz.
UnB | CEAM
pimenta cultural


Franco Perazzoni
chamas de
INJUSTIÇA
Incêndios Florestais,
Saúde e Direitos Humanos
na Amazônia
Núcleo de Estudos Amazônicos
neaz.
UnB | CEAM
| São Paulo | 2026 |
pimenta cultural

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

P427c

Perazzoni, Franco -
Chamas de Injustiça: Incêndios Florestais, Saúde e Direitos Humanos na Amazônia / Franco Perazzoni. – 1. ed. – São Paulo: Pimenta Cultural, 2026.

Livro em PDF

ISBN 978-85-7221-812-2
DOI 10.31560/pimentacultural/978-85-7221-812-2

1. Incêndios florestais. 2. Amazônia. 3. Saúde Pública. 4. Direitos humanos. 5. Justiça ambiental. I. Perazzoni, Franco. II. Título.

CDD: 363.7392

Índice para catálogo sistemático:
I. Incêndios florestais – Impactos ambientais
II. Saúde Pública
Simone Sales • Bibliotecária • CRB: ES-000814/O

Copyright © Pimenta Cultural, alguns direitos reservados.

Copyright do texto © 2026 o autor.

Copyright da edição © 2026 Pimenta Cultural.

Esta obra é licenciada por uma Licença Creative Commons:
Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional - (CC BY-NC-ND 4.0).
Os termos desta licença estão disponíveis em:
<https://creativecommons.org/licenses/>.
Direitos para esta edição cedidos à Pimenta Cultural.
O conteúdo publicado não representa a posição oficial da Pimenta Cultural.

Direção editorial	Patricia Bieging Raul Inácio Busarello
Editora executiva	Patricia Bieging
Gerente editorial	Landressa Rita Schiefelbein
Assistente editorial	Ana Flávia Pivisan Kobata
Diretor de criação	Raul Inácio Busarello
Assistente de arte	Naiara Von Groll
Editoração eletrônica	Stela Tiemi Hashimoto Kanada
Estágio em editoração	Emanuelle Vitória Miranda da Silva Rayssa Santos Arrais
Imagens da capa	Chat GPT - AI Generator
Tipografias	Acumin Variable Concept, MADE Sunflower, PF Fuel
Revisão	O autor
Autor	Franco Perazzoni

PIMENTA CULTURAL
São Paulo • SP
+55 (11) 96766 2200
livro@pimentacultural.com
www.pimentacultural.com

2026

CONSELHO EDITORIAL CIENTÍFICO

Doutores e Doutoras

Adilson Cristiano Habowski
Universidade La Salle, Brasil

Adriana Flávia Neu
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Adriana Regina Vettorazzi Schmitt
Instituto Federal de Santa Catarina, Brasil

Aguimario Pimentel Silva
Instituto Federal de Alagoas, Brasil

Alaim Passos Bispo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Alaim Souza Neto
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Alessandra Knoll
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Alessandra Regina Müller Germani
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Aline Corso
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Aline Wendpap Nunes de Siqueira
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Ana Rosangela Colares Lavand
Universidade Estadual do Norte do Paraná, Brasil

André Gobbo
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

André Tanus Cesário de Souza
Faculdade Anhanguera, Brasil

Andressa Antunes
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Andressa Wiebusch
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Andreza Regina Lopes da Silva
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Angela Maria Farah
Universidade de São Paulo, Brasil

Anísio Batista Pereira
Universidade do Estado do Amapá, Brasil

Antonio Edson Alves da Silva
Universidade Estadual do Ceará, Brasil

Antonio Henrique Coutelo de Moraes
Universidade Federal de Rondonópolis, Brasil

Arthur Vianna Ferreira
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Ary Albuquerque Cavalcanti Junior
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Asterlindo Bandeira de Oliveira Júnior
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Bárbara Amaral da Silva
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Bernadétte Beber
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Bruna Carolina de Lima Siqueira dos Santos
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil

Bruno Rafael Silva Nogueira Barbosa
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Caio Cesar Portella Santos
Instituto Municipal de Ensino Superior de São Manuel, Brasil

Carla Wanessa do Amaral Caffagni
Universidade de São Paulo, Brasil

Carlos Adriano Martins
Universidade Cruzeiro do Sul, Brasil

Carlos Jordan Lapa Alves
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil

Caroline Chioquetta Lorenset
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Cassia Cordeiro Furtado
Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Cássio Michel dos Santos Camargo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Cecilia Machado Henriques
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Christiano Martino Otero Avila
Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Cláudia Samuel Kessler
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Cristiana Barcelos da Silva
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil

Cristiane Silva Fontes
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Daniela Susana Segre Guertzenstein
Universidade de São Paulo, Brasil

Daniele Cristine Rodrigues
Universidade de São Paulo, Brasil

Dayse Centurion da Silva
Universidade Anhanguera, Brasil

Dayse Sampaio Lopes Borges
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil

Deilson do Carmo Trindade
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Brasil

Diego Pizarro
Instituto Federal de Brasília, Brasil

Dorama de Miranda Carvalho
Escola Superior de Propaganda e Marketing, Brasil

Edilson de Araújo dos Santos
Universidade de São Paulo, Brasil

Edson da Silva
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil

Elena Maria Mallmann
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Eleonora das Neves Simões
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eliane Silva Souza
Universidade do Estado da Bahia, Brasil

Elvira Rodrigues de Santana
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Estevão Schultz Campos
Centro Universitário Adventista de São Paulo, Brasil

Éverly Pegoraro
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Fábio Santos de Andrade
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Fabrícia Lopes Pinheiro
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Fauston Negreiros
Universidade de Brasília, Brasil

Felipe Henrique Monteiro Oliveira
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Fernando Vieira da Cruz
Universidade Estadual de Campinas, Brasil

Flávia Fernanda Santos Silva
Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Gabriela Moysés Pereira
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Gabriella Eldereti Machado
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Germano Ehlert Pollnow
Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Universidade Federal do Pará, Brasil

Geymeesson Brito da Silva
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Giovanna Ofretorio de Oliveira Martin Franchi
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Handherson Leyltton Costa Damasceno
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Hebert Elias Lobo Sosa
Universidad de Los Andes, Venezuela

Helciclever Barros da Silva Sales
Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira, Brasil

Helena Azevedo Paulo de Almeida
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Hendy Barbosa Santos
Faculdade de Artes do Paraná, Brasil

Humberto Costa
Universidade Federal do Paraná, Brasil

Igor Alexandre Barcelos Graciano Borges
Universidade de Brasília, Brasil

Inara Antunes Vieira Willerding
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Jaziel Vasconcelos Dorneles
Universidade de Coimbra, Portugal

Jean Carlos Gonçalves
Universidade Federal do Paraná, Brasil

Joao Adalberto Campato Junior
Universidade Brasil, Brasil

Jocimara Rodrigues de Sousa
Universidade de São Paulo, Brasil

Joelson Alves Onofre
Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil

Jónata Ferreira de Moura
Universidade São Francisco, Brasil

Jonathan Machado Domingues
Universidade Federal de São Paulo, Brasil

Jorge Eschriqui Vieira Pinto
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Juliana de Oliveira Vicentini
Universidade de São Paulo, Brasil

Juliano Milton Kruger
Instituto Federal do Amazonas, Brasil

Julianno Pizzano Ayoub
Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil

Julierme Sebastião Morais Souza
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Junior César Ferreira de Castro
Universidade de Brasília, Brasil

Katia Bruginski Mulik
Universidade de São Paulo, Brasil

Laionel Vieira da Silva
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Lauro Sérgio Machado Pereira
Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Brasil

Leonardo Freire Marino
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Leonardo Pinheiro Mozdzenski
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

Letícia Cristina Alcântara Rodrigues
Faculdade de Artes do Paraná, Brasil

Lucila Romano Tragtenberg
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil

Lucimara Rett
Universidade Metodista de São Paulo, Brasil

Luiz Eduardo Neves dos Santos
Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Maikel Pons Giralt
Universidade de Santa Cruz do Sul, Brasil

Manoel Augusto Polastreli Barbosa
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Marcelo Nicomedes dos Reis Silva Filho
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Márcia Alves da Silva
Universidade Federal de Pelotas, Brasil

Marcio Bernardino Sirino
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Marcos Pereira dos Santos
Universidad Internacional Iberoamericana del Mexico, México

Marcos Uzel Pereira da Silva
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Marcus Fernando da Silva Praxedes
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Brasil

Maria Aparecida da Silva Santandel
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

Maria Cristina Giorgi
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Brasil

Maria Edith Maroca de Avelar
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

Marina Bezerra da Silva
Instituto Federal do Piauí, Brasil

Marines Rute de Oliveira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Mauricio José de Souza Neto
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Michele Marcelo Silva Bortolai
Universidade de São Paulo, Brasil

Mônica Tavares Orsini
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Nara Oliveira Salles
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Neide Araujo Castilho Teno
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil

Neli Maria Mengalli
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Brasil

Patricia Bieging
Universidade de São Paulo, Brasil

Patricia Flavia Mota
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Patrícia Helena dos Santos Carneiro
Universidade Federal de Rondônia, Brasil

Rainei Rodrigues Jadejiski
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Raul Inácio Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Raymundo Carlos Machado Ferreira Filho
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Ricardo Luiz de Bittencourt
Universidade do Extremo Sul Catarinense, Brasil

Roberta Rodrigues Ponciano
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Robson Teles Gomes
Universidade Católica de Pernambuco, Brasil

Rodiney Marcelo Braga dos Santos
Universidade Federal de Roraima, Brasil

Rodrigo Amancio de Assis
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

Rodrigo Sarruge Molina
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Rogério Rauber
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Rosane de Fatima Antunes Obregon
Universidade Federal do Maranhão, Brasil

Samuel André Pompeo
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil

Sebastião Silva Soares
Universidade Federal do Tocantins, Brasil

Silmar José Spinardi Franchi
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Simone Alves de Carvalho
Universidade de São Paulo, Brasil

Simoni Urnau Bonfiglio
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Stela Maris Vaucher Farias
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Tadeu João Ribeiro Baptista
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil

Taíza da Silva Gama
Universidade de São Paulo, Brasil

Tania Micheline Miorando
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Tarcísio Vanzin
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Tascieli Feltrin
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Tatiana da Costa Jansen
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Tayson Ribeiro Teles
Universidade Federal do Acre, Brasil

Thiago Barbosa Soares
Universidade Federal do Tocantins, Brasil

Thiago Camargo Iwamoto
Universidade Estadual de Goiás, Brasil

Thiago Medeiros Barros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Tiago Mendes de Oliveira
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Vanessa de Sales Marruche
Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Vanessa Elisabete Raue Rodrigues
Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

Vania Ribas Ulbricht
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Vinicius da Silva Freitas
Centro Universitário Vale do Cricaré, Brasil

Wellington Furtado Ramos
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil

Wellton da Silva de Fatima
Instituto Federal de Alagoas, Brasil

Wenis Vargas de Carvalho
Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil

Yan Masetto Nicolai
Universidade Federal de São Carlos, Brasil

PARECERISTAS E REVISORES(AS) POR PARES

Avaliadores e avaliadoras Ad-Hoc

Alcidinei Dias Alves
Logos University International, Estados Unidos

Alessandra Figueiró Thornton
Universidade Luterana do Brasil, Brasil

Alexandre João Appio
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Artur Pires de Camargos Júnior
Universidade do Vale do Sapucaí, Brasil

Bianka de Abreu Severo
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

Carlos Eduardo B. Alves
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brasil

Carlos Eduardo Damian Leite
Universidade de São Paulo, Brasil

Catarina Prestes de Carvalho
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Brasil

Davi Fernandes Costa
Secretaria Municipal de Educação de São Paulo, Brasil

Denilson Marques dos Santos
Universidade do Estado do Pará, Brasil

Domingos Aparecido dos Reis
Must University, Estados Unidos

Edson Vieira da Silva de Camargos
Logos University International, Estados Unidos

Edwins de Moura Ramires
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Elisiene Borges Leal
Universidade Federal do Piauí, Brasil

Elizabete de Paula Pacheco
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

Elton Simomukay
Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil

Francisco Geová Goveia Silva Júnior
Universidade Potiguar, Brasil

Indiamaris Pereira
Universidade do Vale do Itajaí, Brasil

Jacqueline de Castro Rimá
Universidade Federal da Paraíba, Brasil

Jonas Lacchini
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Brasil

Lucimar Romeu Fernandes
Instituto Politécnico de Bragança, Brasil

Marcos de Souza Machado
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Michele de Oliveira Sampaio
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Nívea Consuêlo Carvalho dos Santos
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Pedro Augusto Paula do Carmo
Universidade Paulista, Brasil

Rayner do Nascimento Souza
Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Brasil

Samara Castro da Silva
Universidade de Caxias do Sul, Brasil

Sidney Pereira Da Silva
Stockholm University, Suécia

Suélen Rodrigues de Freitas Costa
Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Thais Karina Souza do Nascimento
Instituto de Ciências das Artes, Brasil

Viviane Gil da Silva Oliveira
Universidade Federal do Amazonas, Brasil

Walmir Fernandes Pereira
Miami University of Science and Technology, Estados Unidos

Weyber Rodrigues de Souza
Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Brasil

William Roslindo Paranhos
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial da Pimenta Cultural, bem como revisados por pares, sendo indicados para a publicação.



Esta obra resulta da investigação desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Doutoramento em Direitos Humanos, Saúde e Justiça realizado no *Ius Gentium Conimbrigae* – Centro de Direitos Humanos (IGC/CDH), sediado na Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra e no Observatório de Direitos Humanos nos Países de Língua Oficial Portuguesa (POSCOHR), sediado na Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Portugal, entre 2 de dezembro de 2024 e 28 de julho de 2026, sob orientação da Professora Doutora Alexandra Aragão.

As opiniões expressas pelo autor são de sua exclusiva responsabilidade e não refletem, necessariamente, as opiniões da respectiva orientadora, nem do IGC/CDH e POSCOHR, não podendo esses ser responsabilizados pelo seu conteúdo.

O protótipo *Tatatinga*, referido ao longo do livro, está disponível em https://*tatatinga*.kenkwo.workers.dev/.



AGRADECIMENTOS

Seria impossível agradecer nominalmente a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho. Cada pessoa e instituição deixou sua marca nesta pesquisa; por isso, este trabalho também lhes pertence.

Aos colegas e alunos do Núcleo de Estudos Amazônicos da Universidade de Brasília (NEAz), especialmente aos professores Manoel, Enaile e Ana Paula, pelo compromisso em construir conhecimento, fortalecer o diálogo interdisciplinar e defender a Amazônia e seus povos.

Ao *Ius Gentium Conimbrigae* (*IGC*) e ao *Portuguese Speaking Countries Observatory on Human Rights* (*POSCOHR*), na pessoa do Dr. Miguel Costa, e à minha orientadora, Prof.ª Dra. Alexandra Aragão, pelo apoio, incentivo e generosidade que tornaram possível esta trajetória.

Ao amigo Jacson Barros, não apenas pela ajuda na obtenção dos dados, mas, sobretudo, pela amizade, apoio e sugestões.

Ao PCF Sandro Sponchiado, pela ajuda no desenvolvimento dos modelos matemáticos e do Painel *Tatatinga*, bem como pelo apoio técnico e pelas discussões que enriqueceram esta pesquisa.

Ao DPF Agostinho Gomes Cascardo Junior, pela revisão dos manuscritos e contribuições que ajudaram a dar forma a este trabalho.

Ao cacique Anderson Suruí e a todos os integrantes de povos indígenas e comunidades tradicionais da Amazônia, pelos conhecimentos, experiências e vivências compartilhados, fundamentais para compreender os impactos dos incêndios florestais.



Aos bombeiros, brigadistas, profissionais de saúde, fiscais, agentes, policiais e a todos que enfrentam e, portanto, também sofrem, diariamente, as consequências dos incêndios. Esta pesquisa também carrega um pouco de suas histórias, desafios e lutas.

À minha sobrinha Maria Clara, com a esperança de que a ciência continue sendo um caminho de descoberta, compromisso e transformação.

À minha esposa, Alice, pelo amor, paciência e apoio. Palavras nunca bastam. Milhões de beijos.



"Se a Terra adoecer,
nós adoecemos junto.

Não tem jeito de
sermos pessoas saudáveis
com o planeta todo quebrado."

Ailton Krenak (2020)

Escritor, filósofo e líder indígena krenak.
Primeiro indígena a integrar a Academia
Brasileira de Letras.



"Ao contrário da enchente que submergiu cidades inteiras do Rio Grande do Sul em 2024 e mobilizou o país, a devastação da Amazônia não move caminhões de doações. É um desastre ambiental cotidiano, silencioso, muitas vezes enxergado somente por satélites. A floresta em chamas não costuma provocar comoção — a não ser que as cinzas cheguem até o Sudeste, fazendo o dia virar noite, como aconteceu em 2019."

Marina Rossi (2025)

Jornalista investigativa especializada em
Amazônia e direitos humanos



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADPF	Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental
AGU	Advocacia-Geral da União
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET)
BDQUEIMADAS	Banco de Dados de Queimadas (INPE)
BLUP	*Best Linear Unbiased Prediction*
CAMS	*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CNES	Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde
CID-10	Classificação Internacional de Doenças – 10ª Revisão
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
DESC	Direitos Econômicos, Sociais e Culturais
DETER	Detecção de Desmatamento em Tempo Real
DNUDPI	Declaração das Nações Unidas sobre os Direitos dos Povos Indígenas
DSEI	Distrito Sanitário Especial Indígena
EAC4	Reanálise de Composição Atmosférica
ECMWF	*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*
EFFIS	*European Forest Fire Information System*
EUDR	Regulamento Europeu sobre Produtos Livres de Desmatamento
FE	*Fixed Effects* (Efeitos Fixos)
FUNAI	Fundação Nacional dos Povos Indígenas
GLM	*Generalized Linear Model*
GNR/SEPNA	Guarda Nacional Republicana / Serviço de Proteção da Natureza



GTA	Guia de Trânsito Animal
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDARON	Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDLO	*International Development Law Organization*
IGC/CDH	*Ius Gentium Conimbrigae* / Centro de Direitos Humanos
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRR	*Incidence Rate Ratio*
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MapBiomas	Plataforma de Mapeamento da Cobertura e Uso da Terra no Brasil
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MPF	Ministério Público Federal
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PIDESC	Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais
PM2.5	Material Particulado Fino (diâmetro ≤ 2,5 μm)
PNMIF	Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo



PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
POSCOHR	Observatório de Direitos Humanos para os Países de Língua Portuguesa
PPML	*Poisson Pseudo-Maximum Likelihood*
PRODES	Programa de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal
REDD+	Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
RedeMAIS	Plataforma Brasil MAIS (Meio Ambiente Integrado e Seguro)
REML	*Restricted Maximum Likelihood*
SasiSUS	Subsistema de Atenção à Saúde Indígena do Sistema Único de Saúde
SESAI	Secretaria Especial de Saúde Indígena
SFB	Serviço Florestal Brasileiro
SIA-SUS	Sistema de Informações Ambulatoriais do SUS
SIASI	Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígena
SICAR	Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural
SIGEF	Sistema de Gestão Fundiária (INCRA)
SIH-SUS	Sistema de Informações Hospitalares do SUS
SISBOV	Sistema Brasileiro de Identificação Individual Bovina e Bubalina
SRAG	Síndrome Respiratória Aguda Grave
STF	Supremo Tribunal Federal
SUS	Sistema Único de Saúde
TAC	Termo de Ajustamento de Conduta
TI	Terra Indígena
UBS	Unidade Básica de Saúde
UE	União Europeia
UTI	Unidade de Terapia Intensiva
VIGIAR	Vigilância em Saúde Ambiental relacionada à Qualidade do Ar



SUMÁRIO

Apresentação **23**

Manoel Pereira de Andrade
Prefácio **25**

Introdução **32**

A pergunta que orienta este livro 33

Por que olhar para o fogo dessa maneira 35

Fontes, dados e métodos 38

O que os dados permitem afirmar 41

Nota sobre os dados de 2025 41

Como este livro está organizado 42

Nota sobre linguagem e convenções 43

CAPÍTULO 1
A lógica do fogo:
determinantes históricos, econômicos e territoriais **45**

1.1 O fogo na história amazônica:
dos povos indígenas à fronteira agropecuária 48

1.2 A crise de 2024:
dimensão, padrão e ruptura histórica 52

1.3 Dinâmica normativa atual:
legislação, autorizações
e o fogo como insumo de produção 54



1.4 A tríade estrutural:
pecuária, desmatamento e queimadas 57

1.5 Distribuição territorial
e desigualdades socioeconômicas 71

1.6 Terras indígenas e territórios quilombolas:
proteção relativa e pressão externa do fogo 74

1.7 Síntese:
incêndios, desigualdade e vulnerabilidade territorial 80

CAPÍTULO **2**

O fogo que adoece:
exposição, adoecimento e vulnerabilidade **82**

2.1 Referencial teórico:
a abordagem *One Health* 84

2.2 Fontes de dados e metodologia:
como se mede o impacto do fogo na saúde 86

2.3 O problema do PM2.5 na Amazônia:
quando o termômetro não mede bem a febre 93

2.4 O calendário do fogo
e o impacto agudo sobre a saúde 95

2.4.1 O calendário sanitário:
a sazonalidade dos agravos 96

2.4.2 Do calendário à atribuição:
o painel municipal de efeitos fixos 100

2.5 O SUS que não chega:
infraestrutura hospitalar nas regiões mais expostas 104

2.6 A tríplice vulnerabilidade amazônica 111

2.6.1 O agravamento indígena:
evidência empírica da tríplice
vulnerabilidade no extremo 114



2.7 Estimativa da carga sanitária:
casos atribuíveis às queimadas 120

2.8 A dimensão financeira:
gastos hospitalares do SUS
e custo atribuível estimado 122

2.9 Diagnóstico
de percepções institucionais:
o *survey* exploratório 128

2.10 Síntese:
carga sanitária, vulnerabilidade
e direitos humanos 133

CAPÍTULO **3**

O fogo que se enfrenta:
instrumentos jurídicos, tecnológicos
e forenses de responsabilização **135**

3.1 Respostas jurídicas nacionais:
instrumentos, avanços e limites 139

3.1.1 A Política Nacional de Manejo
Integrado do Fogo (Lei n.º 14.944/2024) 140

3.1.2 A atuação da Advocacia-Geral
da União, do Ministério Público Federal
e a jurisprudência do Supremo Tribunal Federal 143

3.1.3 O direito constitucional amazônico
e a hermenêutica territorializada 145

3.2 Respostas regulatórias transnacionais:
o EUDR e o mercado como instrumento
de proteção de direitos humanos 147

3.2.1 O EUDR: rastreabilidade,
mercado e incentivos econômicos
para o fim das queimadas ilegais 147

3.2.2 Jurisprudência climática
internacional e direitos humanos 154



3.3 Soluções tecnológicas:
monitoramento, rastreabilidade
e integração de dados 156

3.3.1 Monitoramento por satélite:
BDQueimadas, PRODES e MapBiomas 156

3.3.2 Rastreabilidade pecuária:
SISBOV, CAR e a infraestrutura
de dados territoriais 159

3.3.3 Integração de bases
e interoperabilidade 160

3.4 Respostas investigativas:
o modelo REML/BLUP para brigadistas e polícia 163

3.4.1 Modelo REML/BLUP:
detecção de anomalias
e apoio à investigação criminal 163

3.5 Respostas sanitárias:
estimação da carga sanitária para gestores
de saúde e responsabilização legal 165

3.5.1 O modelo de painel com efeitos fixos:
da correlação à carga sanitária estimada 165

3.6 Perspectivas futuras:
o protótipo *Tatatinga* 167

3.7 Síntese:
respostas institucionais e agenda jurídico-forense 177

Conclusão 179

Achado empírico:
as causas são conhecidas e evitáveis 179

Achado sanitário:
os impactos são mensuráveis, estruturados
no tempo e profundamente desiguais 181



Achado jurídico:
a desigualdade dos danos
é um problema de direitos humanos 183

O que os dados permitem concluir
e o que permanece em aberto 185

Implicações práticas 187

Consideração final 188

Miguel Ângelo Oliveira Costa
Posfácio 191

Referências 194

Apêndices 208

Apêndice A:
bases de dados e procedimentos
de tratamento dos dados 208

Apêndice B:
instrumento e resultados
do questionário estruturado 213

B.1 Instrumento de coleta de dados 213

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) 214

Bloco A, profissionais de saúde 215

Bloco B, bombeiros e agentes de defesa civil 216

Bloco C, agentes de fiscalização
e do sistema de justiça 217

Bloco D, comunidades tradicionais e indígenas 219

Bloco geral, governança
e políticas públicas (todos os perfis) 221

B.2 Percepções sobre
impunidade e governança:
análise de consenso e divergência 222



B.3 Percepções centrais:
síntese qualitativa 223

Nota metodológica sobre
o ambiente de análise 224

Apêndice C:
modelos forenses, implementação
computacional e produção científica derivada 225

C.1 Modelo 1, REML/BLUP:
predição espaciotemporal de focos 225

C.2 Modelo 2, Painel com efeitos fixos:
estimação da carga sanitária
atribuível às queimadas 226

C.3 Implementação
computacional dos modelos 230

Apêndice D:
mapas exploratórios complementares 231

Apêndice E:
glossário de termos técnicos 236

**Nota sobre o uso de ferramentas
de inteligência artificial 253**

Sobre o autor 254

Sobre o prefaciador 255

Sobre o posfaciador 256

Índice remissivo 257



APRESENTAÇÃO

Os incêndios na Amazônia não terminam quando o fogo se apaga. Seus efeitos permanecem na fumaça que atravessa cidades e comunidades, nos problemas de saúde que chegam aos hospitais, nos territórios afetados e nas dificuldades das instituições para prevenir, responder e responsabilizar.

É a partir dessa perspectiva que este livro aproxima incêndios florestais, saúde pública, direitos humanos e justiça ambiental. A pesquisa mostra que esses temas não podem ser compreendidos isoladamente e que os impactos do fogo são distribuídos de maneira desigual, atingindo de forma particularmente intensa povos indígenas, comunidades tradicionais e outras populações que vivem em áreas mais expostas e vulneráveis.

Os dados revelam que grande parte dos incêndios está relacionada à ação humana. Cerca de 76% dos focos registrados no Brasil e 86% na Amazônia Legal ocorreram fora da vegetação nativa. O fogo, portanto, não pode ser visto apenas como um fenômeno natural. Ele também está relacionado à forma como o território é ocupado e utilizado e às escolhas que determinam onde e quando o fogo ocorre.

Quando essas áreas queimam, a fumaça se espalha muito além do local do incêndio. A análise realizada neste livro encontrou uma associação entre a exposição à poluição do ar e o aumento das internações por doenças cardiovasculares. Na Amazônia Legal, esse aumento foi estimado em cerca de 25%, diante de aproximadamente 11% no conjunto do país, com maior intensidade durante a temporada de queimadas e pico em setembro.



Os efeitos também recaem sobre o sistema de saúde e sobre os recursos públicos. De forma exploratória, a pesquisa estima que cerca de R$ 1,5 bilhão em gastos com internações por doenças cardiorrespiratórias possa estar associado aos incêndios. Por trás desse valor estão pessoas que adoecem, famílias afetadas e serviços públicos pressionados por uma crise que se repete ano após ano.

A resposta a esse problema, entretanto, encontra obstáculos. Um questionário realizado com 124 atores envolvidos com a questão dos incêndios revela uma percepção elevada de impunidade e dificuldades de articulação entre diferentes setores. Os dados de saúde também sugerem uma redução dos atendimentos em alguns dos territórios mais atingidos. Esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois pode estar relacionado a dificuldades de acesso aos serviços, subnotificação ou limitações na capacidade de resposta.

A dimensão do problema também ultrapassa as fronteiras brasileiras. O livro examina regras internacionais, como o Regulamento da União Europeia sobre Produtos Livres de Desmatamento, e discute como as responsabilidades de empresas e as relações comerciais podem contribuir para a proteção do meio ambiente e dos direitos humanos.

Ao reunir dados ambientais e de saúde, análise institucional e uma perspectiva de direitos humanos, este livro propõe olhar para os incêndios de maneira mais ampla. O fogo não representa apenas a perda de vegetação. Seus efeitos alcançam a saúde, os territórios, os serviços públicos e os direitos das pessoas. Compreender essa conexão é um passo fundamental para construir respostas capazes não apenas de combater o fogo, mas de prevenir seus danos, proteger as populações mais vulneráveis e fortalecer a responsabilidade de quem pode evitá-los.



PREFÁCIO

Conheci Franco Perazzoni como estudante nas atividades do Núcleo de Estudos Amazônicos da Universidade de Brasília (NEAz/CEAM/UnB). Hoje, ao escrever estas palavras de apresentação para o livro ***Chamas de Injustiça: Incêndios Florestais, Saúde e Direitos Humanos na Amazônia***, encontro-o também como professor voluntário do NEAz e autor de uma pesquisa que dialoga diretamente com questões que, há muitos anos, fazem parte dos estudos, debates e ações desenvolvidos pelo Núcleo.

Essa trajetória tem, para mim, um significado especial. A Universidade é também um espaço de encontros e de construção de caminhos. Professores e estudantes se aproximam inicialmente em torno dos processos educacionais, mas essa relação se transforma à medida que surgem novas pesquisas, experiências e formas de cooperação. É uma satisfação acompanhar um antigo estudante que continua sua formação, desenvolve suas próprias investigações e passa também a contribuir com as atividades acadêmicas do Núcleo.

O NEAz foi criado em junho de 1987, em um momento importante da história brasileira e da própria Universidade, marcado pelo processo de redemocratização e pela retomada do debate sobre grandes problemas nacionais. Desde então, vem se constituindo como espaço de ensino, pesquisa e extensão dedicado à Amazônia brasileira e continental, reunindo professores, pesquisadores, estudantes, instituições públicas, organizações e movimentos sociais.

Uma das características que orientam esse trabalho é a compreensão de que não existe uma única Amazônia, assim como não existe uma única disciplina capaz de explicá-la. Sua diversidade social, cultural, econômica, territorial e ambiental exige diferentes



olhares e, sobretudo, diálogo entre eles. Questões relacionadas à história, ao território, ao meio ambiente, à saúde, aos direitos humanos, às políticas públicas e aos modos de vida dos povos e populações amazônicas estão profundamente relacionadas.

Essa perspectiva está presente na Especialização em Estudos Amazônicos, que reúne professores, pesquisadores e estudantes de diferentes formações e instituições. A interdisciplinaridade, nesse contexto, não deve permanecer apenas no plano teórico. Ela precisa dialogar com as realidades concretas da região e com os conhecimentos e experiências daqueles que nela vivem.

Uma das experiências que melhor expressa essa concepção é o Projeto de Extensão Vivência Amazônica. Idealizada por estudantes, professoras e professores da UnB em 2016, a iniciativa nasceu de uma inquietação simples: não é possível compreender plenamente a Amazônia apenas dentro de uma sala de aula em Brasília. A preparação começa na Universidade, mas a formação se completa nos territórios e com as pessoas que neles vivem e trabalham.

Em dez edições, a Vivência Amazônica percorreu os nove estados da Amazônia Legal e reuniu mais de trezentos estudantes, professoras, professores e técnicas e técnicos administrativos da Universidade de Brasília e de outras instituições nacionais e estrangeiras. Mais importante que os números, porém, é a experiência de chegar aos territórios, ouvir suas histórias e perceber como dimensões que frequentemente separamos dentro da Universidade aparecem juntas na vida cotidiana.

O conhecimento científico é indispensável, mas se torna mais rico quando dialoga com os saberes, as experiências e as necessidades das populações amazônicas. Talvez esteja aí uma das contribuições mais importantes de um núcleo universitário dedicado aos Estudos Amazônicos: criar espaços nos quais diferentes conhecimentos possam se encontrar.



É nesse contexto que situo o trabalho apresentado neste livro.

Chamas de Injustiça nasceu de uma pesquisa desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Doutoramento em Direitos Humanos, Saúde e Justiça do *Ius Gentium Conimbrigae*/Centro de Direitos Humanos e do Observatório de Direitos Humanos para os Países de Língua Oficial Portuguesa, em Coimbra, sob orientação da Professora Doutora Alexandra Aragão. Sua origem institucional está em Portugal, mas seu objeto e suas perguntas estão profundamente relacionados aos Estudos Amazônicos.

Os incêndios na Amazônia costumam ser percebidos, em primeiro lugar, como um problema ambiental. Evidentemente são. O fogo destrói a vegetação, afeta a biodiversidade, altera ecossistemas e produz emissões que ultrapassam os locais onde se originam. Mas seus efeitos não terminam na floresta.

A fumaça se desloca, pessoas adoecem, serviços públicos são pressionados, comunidades são atingidas e recursos precisam ser mobilizados para enfrentar consequências ambientais e sanitárias. Quando observamos o problema dessa forma, percebemos que o incêndio florestal não pertence exclusivamente ao campo ambiental. Ele envolve também saúde pública, economia, território, direitos humanos, políticas públicas e atuação do Estado.

O mérito desta pesquisa está justamente em procurar compreender essas dimensões de maneira articulada. Franco reúne análises geoespaciais de focos de incêndio e áreas queimadas, informações de saúde pública e saúde indígena, indicadores da infraestrutura sanitária e a percepção de pessoas e instituições que convivem diretamente com o problema. Ao mesmo tempo, examina os incêndios a partir do direito à saúde, da justiça ambiental e das obrigações estatais de proteção das populações vulneráveis.



Essa forma de trabalhar possui grande proximidade com a perspectiva dos Estudos Amazônicos porque a realidade não chega até nós dividida em disciplinas. Para quem vive na Amazônia, um incêndio não é somente um problema das ciências ambientais. A fumaça não é somente um problema da medicina. A ausência de hospitais não é apenas uma questão de administração pública. A degradação de um território não pertence exclusivamente ao Direito. São dimensões diferentes de uma mesma realidade. O livro procura estabelecer essas conexões.

A atenção dedicada aos povos indígenas e às comunidades tradicionais merece destaque. Essas populações mantêm relações históricas e culturais próprias com seus territórios e, ao mesmo tempo, enfrentam dificuldades particulares quando incêndios de grande intensidade atingem os lugares onde vivem. As distâncias, as limitações da infraestrutura pública e as dificuldades de mobilidade e acesso aos serviços de saúde podem ampliar consideravelmente os efeitos de uma emergência ambiental.

É nesse ponto que o título da obra, *Chamas de Injustiça*, adquire seu significado mais amplo. Os danos produzidos pelos incêndios não atingem todos da mesma maneira. Existem territórios e populações mais expostos e, entre eles, grupos que dispõem de menos infraestrutura, recursos materiais e informação para enfrentar suas consequências. Estamos, portanto, diante de uma questão que ultrapassa a proteção ambiental e alcança o campo da justiça socio-ambiental e dos direitos humanos.

Outro aspecto relevante do livro é sua preocupação em não se limitar ao diagnóstico. A pesquisa procura discutir formas de atuação diante do problema, examinando instrumentos de monitoramento, fiscalização e responsabilização e apresentando propostas metodológicas que buscam integrar informações ambientais e sanitárias. Entre elas está o protótipo *Tatatinga*, concebido como ferramenta



para integrar parte dos resultados da pesquisa e contribuir para o monitoramento, a prevenção e o apoio à responsabilização.

Essa preocupação também está presente no trabalho desenvolvido pelo NEAz. A produção de conhecimento sobre a Amazônia não deve estar separada da realidade da região. Interessa ampliar o conhecimento, mas também buscar novas maneiras de compreender essa realidade e contribuir para sua transformação.

Isso não significa atribuir à Universidade respostas que ela não possui. Significa reconhecer sua responsabilidade na produção de conhecimento capaz de dialogar com a sociedade, com as instituições públicas e, principalmente, com aqueles que vivem os problemas estudados.

Nesse sentido, também é importante que a pesquisa reconheça seus próprios limites. O autor explicita o caráter exploratório de parte das análises e dos instrumentos propostos e aponta a necessidade de novas etapas de desenvolvimento e validação. A ciência se constrói assim, acumulando evidências, reconhecendo incertezas, propondo hipóteses e abrindo caminhos para novas investigações.

A Amazônia necessita desse esforço continuado. Seus problemas são históricos e complexos. Envolvem formas de ocupação do território, atividades econômicas, concentração da terra e do poder, conflitos fundiários, conservação da biodiversidade, mudanças climáticas, desigualdades sociais, condições de saúde e presença das políticas públicas. Não existem respostas simples para questões dessa natureza.

Por isso, os Estudos Amazônicos precisam permanecer como espaço de pluralidade e diálogo. Precisamos das Ciências Ambientais, das Ciências Humanas, da Saúde, do Direito, da Economia e das Tecnologias. Precisamos das instituições públicas e da sociedade civil. Precisamos das universidades e dos movimentos



sociais. E precisamos, sobretudo, manter aberto o diálogo com os povos e comunidades da Amazônia.

Precisamos conhecer a floresta sem esquecer de suas gentes.

A própria construção desta pesquisa procurou ouvir diferentes atores. Participaram dela representantes de povos indígenas e comunidades tradicionais, bombeiros e brigadistas, profissionais de saúde, fiscais, agentes e policiais, pesquisadores e outras pessoas que convivem, sob perspectivas distintas, com os incêndios e suas consequências. Essa diversidade de interlocutores é importante porque conhecer a Amazônia não pode significar apenas falar sobre ela. É necessário construir progressivamente formas de produzir novos conhecimentos com aqueles que vivem e atuam em seus territórios, valorizando seus saberes.

Para quem conheceu o autor inicialmente como estudante, é motivo de satisfação acompanhar sua trajetória e, com orgulho, contar hoje com sua participação no NEAz, contribuindo como professor para a formação de outras e outros estudantes.

Mas um livro deve ser apresentado sobretudo pelo que oferece aos seus leitores. *Chamas de Injustiça* nos convida a olhar para os incêndios amazônicos para além das imagens das chamas. Convida-nos a observar o território, as causas do fogo, a fumaça que se desloca, as pessoas que adoecem, as comunidades atingidas, os serviços públicos disponíveis e as responsabilidades envolvidas.

A resposta a esse problema não pertence a uma única disciplina, a uma única instituição ou a um único livro. Exige pesquisa, diálogo, políticas públicas, participação social e compromisso permanente com a Amazônia e suas gentes.

Espero que esta obra contribua para esse esforço, ampliando o conhecimento e o debate sobre os incêndios florestais, seus



impactos sobre a saúde e os direitos das populações amazônicas, estimulando novas pesquisas e aproximando ainda mais a Universidade daqueles que trabalham e vivem na Amazônia.

É com essa expectativa, e também com a satisfação de apresentar o trabalho de alguém que conheci como estudante e hoje encontro como colega, que convido o leitor a conhecer as páginas que seguem.

Manoel Pereira de Andrade
Professor da Universidade de Brasília
Coordenador do Núcleo de Estudos Amazônicos, NEAz/CEAM/UnB



INTRODUÇÃO

Em 19 de agosto de 2019, por volta das 15 horas, o céu de São Paulo ficou escuro como em dia de tempestade, sem que houvesse chuva. O fenômeno resultou da combinação de uma frente fria com a pluma de fumaça das queimadas amazônicas, carregada por correntes de ar a mais de dois mil quilômetros de distância. Aquele episódio não foi um acidente climático isolado. Ele estava diretamente relacionado ao chamado "Dia do Fogo", evento que havia ocorrido dias antes no Pará: uma queimada simultânea e deliberada, coordenada por pecuaristas e grileiros por meio de grupos de aplicativos de mensagens, com o objetivo de consolidar posses de terra ilegais e pressionar o governo a relaxar as fiscalizações ambientais. O resultado chegou a São Paulo como uma névoa densa que apagou o sol e deixou um cheiro de floresta queimada inédito para a maioria dos moradores da capital (Climatempo, 2019). O fenômeno viralizou nas redes sociais e trouxe, pela primeira vez, a dimensão real das queimadas amazônicas ao cotidiano das grandes cidades do Sudeste.

O que o episódio de agosto de 2019 revelou não foi a existência de um problema novo. Revelou que um problema antigo era invisível para quem não vivia no seu epicentro. Aquele mesmo cheiro de floresta queimada que surpreendeu São Paulo chegava, em agosto, setembro e outubro de cada ano, às comunidades ribeirinhas do Pará, às aldeias indígenas de Rondônia e às cidades da fronteira agropecuária do Mato Grosso como realidade cotidiana, sem mobilização de sistemas de saúde, sem responsabilização dos responsáveis e sem qualquer mecanismo efetivo de prevenção ou reparação.

Cinco anos mais tarde, em 2024, a crise atingiu proporções particularmente elevadas. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) registrou 109.943 focos de incêndio entre janeiro e



agosto, alta de 78% em relação ao mesmo período do ano anterior (CNN Brasil, 2024). A área queimada total ultrapassou os 30 milhões de hectares, crescimento de 79% em relação a 2023 (MapBiomas, 2025a). A fumaça voltou a São Paulo, ao Rio de Janeiro e ao Distrito Federal, dessa vez com mais intensidade e duração. E o custo sanitário dessa crise, que os dados apresentados neste livro procuram dimensionar de forma exploratória, recaiu, como sempre, de forma desproporcional sobre as populações amazônicas mais vulneráveis.

A PERGUNTA QUE ORIENTA ESTE LIVRO

A recorrência dos incêndios florestais no Brasil e seus impactos sanitários sobre populações vulneráveis constituem um problema de direitos humanos estrutural e empiricamente mensurável. Contudo, a literatura disponível raramente articula, em um único *framework* analítico, os determinantes econômicos e territoriais dos incêndios, a estrutura temporal de seus impactos sobre a saúde e a suficiência das respostas institucionais existentes, examinados sob a perspectiva do direito à saúde e da justiça ambiental.

A pergunta que orienta este livro pode ser formulada nos seguintes termos: os padrões observados de ocorrência dos incêndios florestais e seus impactos sanitários são compatíveis com hipóteses de violação sistemática do direito à saúde das populações mais vulneráveis, e as respostas institucionais disponíveis, jurídicas, tecnológicas e forenses, são insuficientes para cumprir as obrigações do Estado decorrentes do direito internacional dos direitos humanos? Em caso afirmativo, quais instrumentos analíticos e de política pública poderiam tornar essas respostas mais eficazes?

Responder a essa pergunta exige examinar empiricamente, a partir de abordagem interdisciplinar, se os padrões observados entre



incêndios florestais, vulnerabilidade sanitária e resposta institucional convergem para a caracterização do fenômeno como problema estrutural relevante sob a perspectiva dos direitos humanos — qualificando o debate normativo com evidência empírica exploratória.

O percurso do livro parte, assim, de três questões encadeadas. Primeiro, se a distribuição territorial dos incêndios revela padrões relacionados à ocupação, à vulnerabilidade e à expansão agropecuária, consistentes com o uso do fogo como instrumento de conversão territorial. Segundo, se os indicadores de fogo apresentam associação temporal com determinados desfechos sanitários, com que defasagem e como essa relação varia no tempo e entre regiões. Terceiro, se as respostas jurídicas, regulatórias e tecnológicas disponíveis são suficientes para prevenir os incêndios e responsabilizar os seus autores — pergunta que se examina tanto pela análise crítica desses instrumentos quanto pelas percepções dos atores diretamente envolvidos, marcadas pela descrença na responsabilização e por uma cegueira institucional recíproca.

Cada questão corresponde a um capítulo e a uma tarefa analítica. O primeiro identifica e documenta os determinantes estruturais dos incêndios, com ênfase na tríade pecuária–desmatamento–queimadas e na sua sobreposição territorial com populações vulneráveis. O segundo mede empiricamente os impactos das queimadas sobre a saúde: quais categorias de doenças são afetadas, com que defasagem temporal e com que custo para o sistema público de saúde. O terceiro avalia criticamente a suficiência das respostas existentes e propõe instrumentos analítico-forenses orientados por evidência — o modelo REML/BLUP, para a priorização investigativa; um painel de efeitos fixos, para a estimação da carga sanitária atribuível (*health burden*), isto é, o excesso de morbidade e de demanda assistencial associado à exposição ambiental; e a sua integração ao protótipo *Tatatinga,* sistema computacional que reúne os achados em um instrumento de monitoramento e de apoio à prevenção e à responsabilização.



Cabe um esclarecimento sobre o estatuto dessas questões. Elas são formuladas como afirmações a testar e a qualificar empiricamente, não como conclusões antecipadas. As duas primeiras são examinadas por análise correlacional exploratória, que identifica associações e não estabelece causalidade; a inferência mais robusta quanto aos desfechos sanitários apoia-se no modelo de painel com efeitos fixos, estimado aqui em caráter de prova de conceito e detalhado no Capítulo 2. A terceira é examinada pela análise crítica das respostas institucionais (Capítulo 3) e pelo diagnóstico qualitativo-quantitativo das percepções dos atores, recolhidas por questionário estruturado (seção 2.9).

POR QUE OLHAR PARA O FOGO DESSA MANEIRA

Esta pesquisa parte do reconhecimento de que os incêndios florestais na Amazônia não constituem apenas problema ambiental, mas fenômeno complexo com implicações sanitárias, territoriais, regulatórias, institucionais e de direitos humanos, cuja compreensão adequada exige abordagem necessariamente interdisciplinar. A fragmentação disciplinar convencional, que trata as queimadas ora como problema ambiental, ora como questão de saúde pública, ora como desafio jurídico, ora como problema de governança, tem dificultado a identificação dos mecanismos estruturais que alimentam o ciclo do fogo e a formulação de respostas proporcionalmente integradas.

Parte, igualmente, da premissa de que problemas estruturais de saúde pública e direitos humanos não podem ser examinados exclusivamente no plano normativo-abstrato. A complexidade do fenômeno exige diálogo com evidência empírica, ainda que exploratória e necessariamente limitada, capaz de qualificar o debate



jurídico para além da mera descrição normativa. Mais do que encerrar o debate com respostas definitivas, o objetivo desta investigação é torná-lo empiricamente mais qualificado, identificando padrões, vulnerabilidades e sinais consistentes que permitam melhor compreensão da dimensão sanitária e jurídica do problema.

A relevância do exercício assenta em três dimensões complementares. No plano empírico, o período 2019–2024 é o mais crítico da história recente das queimadas brasileiras, com 1.273.473 focos registrados, dos quais 99.923 detectados dentro dos próprios polígonos das Terras Indígenas (métrica estrita, equivalente a 7,85% do total nacional e a 210 etnias afetadas em 430 municípios). Em um recorte mais amplo, que contabiliza todos os focos dos municípios que contêm pelo menos uma Terra Indígena, área muito maior que a do território em si, somam-se 178.104 focos, ou 26,6% dos focos da Amazônia Legal. As duas medidas não se confundem: a primeira mede o fogo dentro do território e a segunda no município inteiro que o abriga, e são detalhadas na seção 1.6. Os gastos do Sistema Único de Saúde (SUS) em internações cardiorrespiratórias no período atingiram R$ 30,89 bilhões, com tendência de crescimento alinhada à intensificação das queimadas. A sistematização desses dados em um único estudo, articulada com análise de impactos sanitários por defasagem temporal, é uma lacuna que este livro busca preencher.

Na dimensão normativa, a Resolução 76/300 da Assembleia Geral das Nações Unidas (Organização das Nações Unidas – ONU, 2022) reconheceu o direito a um ambiente limpo, saudável e sustentável como direito humano universal. Esse reconhecimento consolida uma trajetória normativa de mais de três décadas: já a Resolução 45/94 (ONU, 1990) da mesma Assembleia afirmava o direito de toda pessoa a viver em ambiente adequado à sua saúde e bem-estar, e a Conferência do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento (ONU, 1992) firmou o ambiente saudável e a saúde humana como pilares interdependentes do desenvolvimento sustentável (Moreira; Gomes, 2013). O Comentário Geral n.º 14 do Comitê DESC (ONU, 2000) fornece



o marco interpretativo do direito à saúde aqui adotado: seus critérios são apresentados na seção 1.4 e a sua leitura territorializada é desenvolvida na seção 3.1.3. A aplicação desse marco normativo ao contexto específico das queimadas amazônicas e das populações afetadas é uma contribuição jurídica que este trabalho formaliza.

A jurisprudência do Supremo Tribunal Federal examinada na seção 3.1.2 ilustra esse deslocamento da resposta episódica à abordagem estrutural: ao reconhecer a omissão estatal no controle do desmatamento na Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental (ADPF) 760 (Supremo Tribunal Federal – STF, 2024) e no enfrentamento das mudanças climáticas por meio da ADPF 708 (STF, 2022), a Corte passou a exigir, diante da falha crônica da cooperação federativa, o cumprimento dos deveres ambientais do Estado. É reação à mesma intermitência estatal que, no plano sanitário, este livro documenta empiricamente: a ausência seletiva do Estado precisamente nos territórios mais expostos ao fogo.

No campo penal, a hermenêutica territorializada aponta para um direito penal ambiental estrutural, que, em vez de se concentrar no agente final da cadeia, dirige-se às estruturas econômicas e institucionais que sustentam o ilícito, atacando a conexão entre grilagem, desmatamento, garimpo ilegal e lavagem de ativos (Pereira; Perazzoni, 2024). A perspectiva converge diretamente com o diagnóstico aqui apresentado, que trata o fogo não como evento isolado, mas como instrumento de um processo organizado de conversão da floresta em pasto, cuja responsabilização exige alcançar quem dele se beneficia economicamente, e não apenas quem ateia a chama.

Metodologicamente, a pesquisa propõe dois modelos analíticos, um de predição espaço-temporal de focos e um de estimação do impacto sobre a saúde, concebidos para apoiar o avanço da correlação estatística em direção a inferências mais sólidas, úteis à responsabilização jurídica dos agentes causadores de incêndios ilegais. Ambos os modelos são apresentados como propostas em



desenvolvimento, e não como instrumentos validados: a sua formalização e os seus limites são discutidos no Capítulo 3 e no Apêndice C. A articulação entre ciência forense ambiental e direitos humanos é o eixo da contribuição que este trabalho procura oferecer.

É nesses três planos, aliás, que se situa o que o livro pretende acrescentar. No plano empírico, integra em um único estudo análises geoespaciais de focos de incêndio, indicadores de saúde pública, dados da saúde indígena e percepções de atores institucionais diretamente envolvidos na resposta às queimadas. No plano jurídico, examina os incêndios florestais sob a ótica do direito à saúde, da justiça ambiental e das obrigações estatais de proteção de grupos vulneráveis. No plano metodológico, apresenta instrumentos analíticos destinados a apoiar investigações, monitoramento e formulação de políticas públicas, cujos resultados devem ser compreendidos à luz de seu caráter exploratório e de seu estágio de desenvolvimento.

FONTES, DADOS E MÉTODOS

Esta pesquisa tem natureza predominantemente exploratória e interdisciplinar. Seu objetivo não é produzir demonstração causal definitiva a partir de um único desenho analítico, mas integrar diferentes fontes de evidência para identificar padrões espaciais, temporais e institucionais relevantes sob a ótica da saúde pública e dos direitos humanos. A opção metodológica adotada decorre da própria natureza do objeto investigado, que envolve fenômeno estrutural, multifatorial e institucionalmente complexo, que escapa a abordagens analíticas unidimensionais. Nenhum dos instrumentos empregados, isoladamente, pretende esgotar a explicação do fenômeno; o seu valor reside na leitura convergente das diferentes fontes de evidência mobilizadas.



A pesquisa adota abordagem mista, combinando análise quantitativa e qualitativa, e organiza-se em quatro eixos metodológicos complementares.

Eixo 1: Análise geoespacial. Processamento de 1.273.473 focos de incêndio do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas), sistema mantido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que reúne os focos de calor detectados por satélite em todo o território nacional, com atualização diária (INPE, 2025a; Setzer *et al.*, 2019), referentes a 2019–2024, com metodologia ponto-em-polígono em Python 3.11/GeoPandas, cruzados com polígonos de 638 Terras Indígenas (Fundação Nacional dos Povos Indígenas – FUNAI, 2024) e 94 Territórios Quilombolas (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, 2024). Correlações de Pearson entre queimadas, rebanho bovino (Pesquisa Pecuária Municipal do IBGE; IBGE, 2024a), desmatamento e IDH (Atlas do Desenvolvimento Humano; PNUD *et al.*, 2022); n = 772 municípios da Amazônia Legal.

Eixo 2: Análise temporal de impactos sanitários. A relação entre fogo e saúde foi examinada por duas abordagens complementares: uma descritiva, da sazonalidade mensal de cada categoria diagnóstica (o calendário sanitário do fogo), e outra inferencial, um modelo de painel com efeitos fixos de município e de ano-mês, estimado por pseudomáxima verossimilhança de Poisson e com controles climáticos, em base municipal-mensal de janeiro/2019 a dezembro/2024, nos dois recortes regionais (Amazônia Legal e Resto do Brasil). Como variáveis de exposição utilizaram-se três indicadores ambientais (PM2.5/*Copernicus Atmosphere Monitoring Service* [CAMS], área queimada/MapBiomas, focos/INPE) e, como desfechos, nove categorias diagnósticas da CID-10 do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS), bases SIA-SUS e SIH-SUS. Essa análise é complementada pela exploração da série anual do Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígena (SIASI/SESAI/MS) para o período 2020–2025 (~1,82 milhão de registros desagregados por Distrito Sanitário Especial Indígena, polo base, aldeia,



categoria profissional e faixa etária), utilizada para caracterizar a capacidade operacional da rede de saúde indígena, comparar a oferta de cuidados disponível à população indígena com a disponível à população geral, e documentar a trajetória de atendimentos nas Terras Indígenas mais afetadas pelo fogo. A documentação completa das bases, dos procedimentos de tratamento e do ambiente computacional consta do Apêndice A.

Eixo 3: Diagnóstico por questionário. Questionário estruturado com escala *Likert* de sete pontos aplicado a 124 respondentes em quatro perfis: profissionais de saúde, bombeiros e agentes de defesa civil, agentes de fiscalização e do sistema de justiça, e membros de comunidades tradicionais e indígenas. O instrumento completo e os resultados detalhados constam do Apêndice B.

Eixo 4: Modelagem forense (proposta). Formulação de dois modelos analíticos, em coautoria com peritos da Polícia Federal e já apresentados em produção científica. O primeiro, o *REML/BLUP* (Sponchiado; Perazzoni; Magliano, 2025), formulado para identificar padrões anômalos de focos de incêndio sugestivos de origem deliberada, como apoio à priorização investigativa de polícia e fiscalização. O segundo, um painel de efeitos fixos apresentado no 24º Encontro Trienal da *International Association of Forensic Sciences* (IAFS 2026) (Perazzoni *et al.*, 2026), voltado a estimar quanto das internações hospitalares pode ser atribuído às queimadas, como apoio a gestores de saúde e ao sistema de justiça; a sua prova de conceito consta do Capítulo 2. Ambos são apresentados em caráter de proposta, com implementação plena pendente do protótipo *Tatatinga*; as especificações constam do Apêndice C.

As limitações metodológicas centrais são reconhecidas e explicitadas ao longo do texto: as correlações são exploratórias e bivariadas; a amostra do questionário é intencional, não probabilística; e o modelo de painel municipal foi estimado em caráter de prova de conceito, com aprofundamento previsto em trabalho subsequente.



O QUE OS DADOS PERMITEM AFIRMAR

As análises realizadas identificam associações espaciais, temporais e institucionais relevantes para a compreensão do fenômeno estudado. Contudo, a existência de associação estatística não deve ser interpretada como demonstração automática de causalidade. As conclusões deste trabalho resultam da convergência de múltiplas fontes de evidência, ambientais, sanitárias, territoriais e jurídicas, e não da pretensão de atribuir causalidade individualizada a eventos específicos. Sempre que utilizadas expressões como impacto, efeito ou influência, essas devem ser compreendidas dentro dos limites metodológicos explicitados nestas páginas.

NOTA SOBRE OS DADOS DE 2025

Os dados empíricos deste livro cobrem o período 2019–2024. Ao longo de 2025, o cenário de queimadas no Brasil melhorou expressivamente em relação ao pico de 2024: o INPE registrou queda de 61% nos focos de janeiro a outubro (84.896 contra 218.765 no mesmo período de 2024), com redução de 78% na Amazônia e 96% no Pantanal (INPE, 2025b). A área queimada recuou 23% em todo o país (WWF Brasil, 2026).

O INPE atribui a melhora a três fatores combinados: ausência de El Niño ou La Niña, que manteve as condições climáticas dentro da normalidade; políticas públicas de prevenção implementadas a partir da PNMIF, com o maior efetivo de brigadistas da história (4.385 profissionais) e reforço da frota aérea; e menor acúmulo de biomassa disponível após os grandes incêndios de 2024 (INPE, 2025b). A atribuição precisa de quanto cada fator contribuiu ainda não foi estabelecida por estudo específico. O que os dados de 2025 confirmam



é o argumento central desta pesquisa: os incêndios respondem a políticas públicas. A volatilidade interanual dos resultados reforça a necessidade de consolidação permanente da capacidade institucional, não de dependência das condições climáticas favoráveis.

COMO ESTE LIVRO ESTÁ ORGANIZADO

Este livro está organizado em três capítulos, conclusão e apêndices. O Capítulo 1, "A lógica do fogo", documenta por que os incêndios ocorrem: a trajetória histórica do fogo no Brasil, a crise de 2024 como evento-síntese, a nova arquitetura normativa, a tríade estrutural pecuária-desmatamento-queimadas com evidência empírica e a distribuição territorial dos focos sobre territórios protegidos. O Capítulo 2, "O fogo que adoece", documenta como os incêndios afetam a saúde: o referencial *One Health*, o desempenho comparativo dos indicadores de exposição na Amazônia, os padrões de adoecimento por categoria diagnóstica e defasagem temporal, a infraestrutura hospitalar disponível, o índice de tríplice vulnerabilidade e o custo estimado ao SUS. O Capítulo 3, "O fogo que se enfrenta", documenta as respostas disponíveis e seus limites: percepções dos atores diretamente envolvidos, mecanismos jurídicos nacionais e internacionais, tecnologias de monitoramento e rastreabilidade, e os dois modelos forenses desenvolvidos, incluindo o protótipo *Tatatinga*, sistema computacional, disponibilizado via internet (https://*tatatinga*.kenkwo.workers.dev/), que integra os achados da pesquisa em um instrumento de monitoramento e de apoio à prevenção e à responsabilização. A Conclusão articula os três elos do argumento e propõe implicações práticas para a política pública, para o direito e para a agenda de pesquisa. As especificações metodológicas detalhadas constam de Notas Técnicas ao longo do texto e dos apêndices ao final, para fins de replicação.



A questão central não é apenas compreender por que o fogo ocorre ou quais danos produz. É compreender em que medida uma sociedade democrática pode considerar aceitável a persistência de impactos previsíveis, recorrentes e desigualmente distribuídos sobre populações cuja proteção constitui obrigação jurídica expressa do Estado.

NOTA SOBRE LINGUAGEM E CONVENÇÕES

Este livro adota linguagem predominantemente acessível, sem abdicar do rigor técnico. As fórmulas, os critérios estatísticos e as especificações das fontes de dados estão reunidos em caixas de Nota Técnica, distribuídas ao longo do texto, e nos apêndices ao final, permitindo que leitores com diferentes formações acompanhem o argumento sem que o corpo do texto seja interrompido por especificações que apenas o leitor técnico necessita verificar. As referências seguem as normas da ABNT. Os valores monetários estão expressos em reais brasileiros (R$). As siglas são apresentadas por extenso na primeira ocorrência. Para apoiar a leitura por públicos de diferentes áreas, a obra conta ainda com dois instrumentos ao final: a Lista de Abreviaturas e Siglas, que expande cada sigla, e o Apêndice E, Glossário de Termos Técnicos, que explica, em linguagem simples e elaborada pelo próprio autor, os principais conceitos de estatística, sensoriamento remoto, saúde, direito e cadeia produtiva empregados ao longo do texto. O texto segue as normas do Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990 e, por se tratar de pesquisa conduzida no Brasil e sobre a realidade brasileira, adota prioritariamente a grafia e as convenções do português brasileiro. Parte das referências corresponde a trabalhos do próprio autor, artigos, pareceres, comunicações e protótipo de painel *online*, produzidos no decurso deste pós-doutoramento; mais do que autocitações, documentam etapas do percurso de investigação que conduziu a este livro.



Quanto à terminologia do fogo, as expressões “incêndios florestais” e “queimadas” são empregadas ao longo do texto, em algumas passagens, em sentido amplo e não taxonômico, acompanhando o uso das fontes consultadas e diferentes convenções terminológicas. Quando a distinção técnica ou jurídica é relevante — como no manejo tradicional, no fogo prescrito, na queima controlada ou no incêndio não controlado — ela é expressamente indicada. Essa opção terminológica não altera as variáveis empíricas utilizadas, identificadas especificamente como focos de incêndio/focos de calor e área queimada. As duas expressões contam ainda com entradas próprias no Glossário (Apêndice E).



1

A LÓGICA DO FOGO:

DETERMINANTES HISTÓRICOS, ECONÔMICOS E TERRITORIAIS



Antes de examinarmos o caso amazônico, cumpre situá-lo num quadro mais amplo. O fogo florestal deixou de ser anomalia regional para se tornar fenômeno planetário, a ponto de a literatura recente falar em piroceno, a era do fogo: se o domínio das chamas tornou possível o antropoceno, a perda desse domínio estaria convertendo o fogo na principal força de transformação das paisagens (Resco de Dios, 2023). Os números europeus recentes confirmam-no. Em 2025, a União Europeia registrou 1.079.538 hectares queimados em 7.783 incêndios distribuídos por 25 dos 27 Estados-membros, a maior marca de toda a série do Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais (Comissão Europeia, 2026). E o flagelo não se restringe aos grandes países florestais: Portugal, cujo território corresponde a cerca de 1% do brasileiro, foi o país da União com maior área ardida em 2024, com quase 450 km², à frente da Bulgária e da Espanha (Cardoso; Yilmaz, 2025), e sofreu em 2025 a quarta pior temporada desde 1980, com 250 mil hectares queimados, cinco mortes e o maior incêndio já registrado no país, responsável por 68,5 mil hectares em oito dias; no ano recorde de 2017 arderam cerca de 540 mil hectares, quase 6% do território nacional, e morreram 117 pessoas (Viegas *et al.*, 2026).

Os agregados, porém, ocultam aquilo que mais importa a uma análise jurídica, que é a causa, e comparar hectares entre países sem antes comparar as causas produz equivalências falsas. A Agência Europeia do Ambiente estima que comportamentos e atividades humanas respondam, direta ou indiretamente, por 95% dos incêndios florestais na Europa (Cardoso; Yilmaz, 2025), mas predominantemente sob a forma de negligência. Em Portugal, das 12.262 ocorrências de incêndio rural investigadas pela GNR/SEPNA em 2018, as causas naturais responderam por apenas 2%, o incendiarismo doloso por 21% e os comportamentos humanos não intencionados à produção de fogo por 53% (Aragão, 2020). Acresce que a própria inflamabilidade do território português é de origem humana, ainda que por omissão, pois desde 1960 as áreas florestais



e de matos expandiram-se enquanto a área agrícola recuou, cerca de 90% do solo florestal é privado, muito fragmentado e de titularidade frequentemente indefinida, e a continuidade de combustível resultante do abandono rural pesa mais do que a presença isolada de qualquer espécie (Viegas *et al.*, 2026). O regime adequado é, aí, o da prevenção comportamental.

A Amazônia constitui um tipo distinto, e a diferença não é de grau, mas de natureza. Aqui o fogo não é predominantemente acidental, como no padrão mediterrânico: ele é humano, instrumental e, em larga medida, ilícito, empregado como técnica de conversão da cobertura florestal em área produtiva. Os dados deste capítulo demonstram-no: 86,3% dos focos da Amazônia Legal ocorrem em áreas de desmatamento recente ou consolidado, restando apenas 13,6% em vegetação nativa. Acresce uma diferença ecológica que a comparação torna imperioso explicitar. Ao contrário dos biomas em que o fogo integra o ciclo natural de regeneração, a floresta tropical úmida não é adaptada à queima recorrente, de modo que a ignição natural, já residual em Portugal, é aqui ecologicamente implausível, e o fogo só se propaga onde a floresta houver sido previamente degradada ou seca. Distinguindo-se, por fim, quem torna o território inflamável de quem o incendeia, o contraste completa-se: em Portugal, a primeira condição decorre de omissão e a segunda de negligência; na Amazônia, a primeira resulta de desmatamento deliberado e a segunda serve a um propósito produtivo determinado, sendo ambas, com frequência, obra do mesmo agente.

Daí a consequência que organiza esta pesquisa. Onde o fogo integra o ciclo ecológico do bioma, a responsabilidade é difusa e o instrumento é a política pública; onde decorre de negligência, o instrumento é a regulação de condutas; onde é exógeno ao ecossistema, deliberado, economicamente motivado e penalmente tipificado, o que está em causa é a responsabilização, e o déficit a explicar deixa de ser meteorológico para ser de efetividade da persecução. Acresce que a fumaça atravessa fronteiras, o que desloca o problema da



escala nacional: o Princípio 2 da Declaração do Rio (ONU, 1992) e as três opiniões consultivas emitidas entre maio de 2024 e julho de 2025 pelo Tribunal Internacional do Direito do Mar, pela Corte Internacional de Justiça e pela Corte Interamericana de Direitos Humanos, examinadas na seção 3.2.2, reconhecem deveres estatais de prevenção e devida diligência, num contexto em que a injustiça climática é, no Sul global, antes de tudo injustiça social (Ogunbode, 2022). Longe de atenuar o diagnóstico brasileiro, portanto, o panorama global o agrava: o que noutras latitudes é fatalidade climática ou acidente é, na Amazônia, conduta evitável, imputável e penalmente tipificada. Fixado esse pano de fundo, passamos ao caso amazônico, começando pela longa história da sua relação com o fogo.

1.1 O FOGO NA HISTÓRIA AMAZÔNICA: DOS POVOS INDÍGENAS À FRONTEIRA AGROPECUÁRIA

A relação entre os seres humanos e o fogo na Amazônia remonta a pelo menos dez mil anos. Estudos paleoecológicos baseados na análise de carvão sedimentar indicam que incêndios naturais ocorriam episodicamente no bioma, sobretudo em períodos de intensa atividade do fenômeno *El Niño*. Quando os primeiros grupos humanos ocuparam a região, passaram a incorporar o fogo a práticas de manejo da paisagem, utilizando queimadas controladas, ajustadas à sazonalidade e aplicadas de forma rotativa para renovação da vegetação secundária, estímulo à brotação e melhoria das condições de cultivo. A chamada terra preta de índio, identificada em centenas de sítios arqueológicos amazônicos, constitui evidência material de que esse manejo contribuiu para a formação de sistemas produtivos duradouros e para o acúmulo de capital natural, em contraste com processos de degradação ambiental (Pyne, 2001; Silveira *et al.*, 2020).



A presença do fogo, portanto, não constitui um elemento exógeno à história amazônica. O que distingue os diferentes períodos históricos não é a simples utilização do fogo, mas sua escala, finalidade, intensidade e inserção nos sistemas de ocupação do território. Durante milênios, o fogo integrou práticas de manejo compatíveis com a regeneração da paisagem e com a manutenção da biodiversidade. O problema contemporâneo não reside no uso do fogo em si, mas na transformação de sua função ecológica e social em instrumento de conversão acelerada da cobertura florestal.

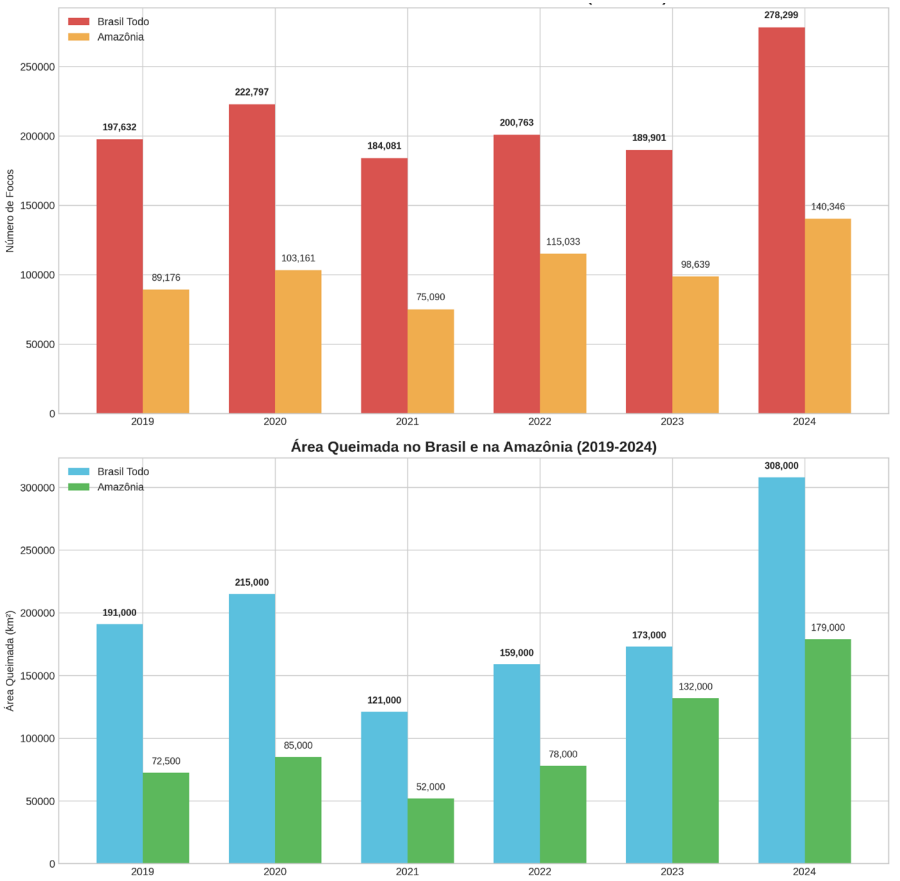
Essa transformação ocorreu de forma particularmente intensa a partir da segunda metade do século XX. A abertura de grandes eixos rodoviários, como a Belém-Brasília, a Transamazônica e a Cuiabá-Santarém, associada aos programas federais de colonização dirigida, acelerou a expansão da fronteira agropecuária sobre o bioma amazônico. Nesse contexto, o fogo consolidou-se como um mecanismo de baixo custo privado para remoção rápida da biomassa vegetal e conversão de áreas florestais em pastagens e áreas agrícolas. Embora economicamente vantajosa para os agentes diretamente envolvidos, essa prática transfere parcela significativa de seus impactos para a coletividade, por meio do aumento da poluição atmosférica, dos danos à saúde, da perda de serviços ecossistêmicos e da intensificação das pressões climáticas.

Os dados analisados nesta pesquisa ilustram a magnitude desse processo. Entre 2019 e 2024, foram registrados 1.273.473 focos de incêndio no Brasil, dos quais aproximadamente metade ocorreu na Amazônia (Figura 1). O período culmina em 2024, ano que concentrou os maiores valores da série tanto para número de focos quanto para área queimada. A Figura 1 evidencia não apenas a persistência do problema, mas também uma ruptura em relação aos anos anteriores, sugerindo a intensificação recente das pressões sobre o bioma amazônico. Esse padrão reforça a necessidade de compreender os incêndios florestais não apenas como fenômenos ambientais, mas também como eventos com repercussões econômicas, sanitárias



e sociais amplas. Em diversos contextos, a expansão de atividades econômicas sobre áreas florestais tem sido associada a processos de ocupação irregular do território, desmatamento e criminalidade ambiental, ampliando os desafios para a fiscalização e a governança ambiental (Pereira; Perazzoni, 2024).

Figura 1 – Focos de incêndio e área queimada — Brasil e Amazônia (2019–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a) e MapBiomas (2024).

Nota: Painel superior: número de focos (INPE); painel inferior: área queimada em km² (MapBiomas).



Os números deste capítulo apoiam-se em duas medidas que não são intercambiáveis. Os focos de incêndio são contagens de anomalias térmicas registradas por sensores térmicos a bordo de satélites, como os do programa Queimadas do INPE, e exprimem-se em número de focos por município. A área queimada é a extensão de superfície atingida pelo fogo, mapeada pela interpretação de imagens ópticas de satélite, como as do Monitor do Fogo do MapBiomas, iniciativa colaborativa de universidades, organizações não governamentais e empresas de tecnologia que mapeia anualmente, a partir de imagens de satélite, o uso e a cobertura do solo e as cicatrizes de fogo no Brasil (MapBiomas, 2024), e exprime-se em hectares ou quilômetros quadrados por município. Uma capta o fogo ativo no instante em que o satélite passa; a outra reconstrói a cicatriz deixada pela queima. Por isso, ainda que fortemente associadas, as duas grandezas não coincidem, e as análises ao longo do texto indicam, em cada caso, qual delas está em uso.

A distinção entre o uso tradicional do fogo e os incêndios associados à conversão de grandes áreas possui importantes implicações jurídicas, mas só foi formalmente incorporada ao ordenamento jurídico brasileiro em 2024, pela Lei nº 14.944/2024, que instituiu a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF) e reconheceu o manejo tradicional de povos indígenas e comunidades tradicionais como prática legítima de gestão territorial.

Mais do que um ajuste técnico, essa mudança reconhece que diferentes regimes de uso do fogo exigem respostas jurídicas distintas, cuja dinâmica e cujos limites são examinados na seção 1.3. Compreender essa trajetória histórica é fundamental para interpretar a crise contemporânea dos incêndios florestais na Amazônia, tema que se tornou particularmente evidente nos eventos extremos observados em 2024.



1.2 A CRISE DE 2024:
DIMENSÃO, PADRÃO E RUPTURA HISTÓRICA

O ano de 2024 consolidou-se como um ponto de inflexão na trajetória das queimadas no Brasil. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) registrou 109.943 focos de incêndio entre janeiro e agosto, representando aumento de 78% em relação ao mesmo período de 2023 (CNN Brasil, 2024). O MapBiomas Fogo documentou que a área queimada total no Brasil em 2024 ultrapassou os 30 milhões de hectares, crescimento de 79% em relação ao ano anterior (MapBiomas, 2025a). Em agosto daquele ano, foram registrados 68.635 focos em um único mês, valor que seria superado em setembro.

Esses 109.943 focos correspondiam apenas ao período de janeiro a agosto; considerando o ano completo, os dados do INPE confirmam a dimensão da ruptura: 2024 fechou com 278.300 focos de incêndio, aumento de 46,5% em relação ao total de 2023 e o maior número desde 2010, superando inclusive o pico da crise de 2019. A Amazônia Legal respondeu por 140.346 focos (50,4% do total nacional), seguida pelo Cerrado, com 81.432. Apenas o mês de setembro concentrou 83.154 focos ativos, o maior registro mensal desde o início da série histórica, em 1998 (INPE, 2025a).

A Amazônia concentrou o epicentro da crise. Foram 17,9 milhões de hectares queimados no bioma, a maior extensão dos últimos seis anos e correspondente a 58% de toda a área queimada no país, um aumento de 67% em relação a 2023 (MapBiomas, 2025a). Um dado que merece atenção foi a inversão da classe de vegetação mais atingida: pela primeira vez, as formações florestais primárias suplantaram as pastagens como o tipo de cobertura que mais queimou na Amazônia. Essa mudança sinaliza que o fogo deixou de incidir exclusivamente sobre áreas já degradadas e passou a avançar sobre florestas íntegras, tornando-as mais suscetíveis



a novos incêndios em um ciclo de retroalimentação destrutivo (Aragão; Shimabukuro, 2010).

Além da Amazônia, outros biomas registraram marcas históricas. O Cerrado teve 9,7 milhões de hectares queimados, com 85% em vegetação nativa e aumento de 47% sobre a média dos últimos seis anos. Que a maior parte tenha ardido em vegetação nativa não surpreende: diferentemente da Amazônia, o Cerrado é um bioma de savana, que convive historicamente com o fogo recorrente. O Pantanal acumulou 1,9 milhão de hectares afetados, expansão de 64% em relação à média histórica. A Mata Atlântica, bioma não adaptado ao fogo, registrou a maior área queimada em um único ano desde 1985, com 1,2 milhão de hectares, superando em 261% sua média histórica (Agência Brasil, 2025; MapBiomas, 2025b). A distinção retoma, no plano interno, a que se traçou na abertura deste capítulo: mesmo dentro do Brasil o fogo não admite tratamento uniforme, pois no Cerrado percorre o ecossistema a que pertence, ao passo que na Amazônia, onde apenas 13,6% dos focos incidem sobre vegetação nativa (seção 1.4), percorre o que já deixou de ser floresta.

A crise de 2024 não foi um evento climático isolado. Ela ocorreu em um contexto em que o desmatamento apresentava tendência de queda, o que demonstra que os incêndios não podem ser explicados exclusivamente como subproduto do desmatamento recente. Contribuíram o El Niño de 2023–2024, de intensidade moderada a forte, os efeitos retardados do desmatamento de anos anteriores, que produz biomassa morta disponível para queima, e a prática persistente de queimadas em pastagens para renovação de cobertura vegetal (Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2024). A fumaça gerada atingiu simultaneamente mais de 20 estados brasileiros e chegou a São Paulo e Brasília com concentrações de poluentes que geraram alertas sanitários em escala nacional, tornando visível para o conjunto da população um problema historicamente confinado às populações mais vulneráveis da Amazônia.



O que 2024 tornou visível, portanto, não foi uma surpresa climática, mas a materialização aguda de pressões estruturais acumuladas ao longo de décadas: um modelo econômico que instrumentaliza o fogo, uma capacidade institucional de resposta insuficiente e uma distribuição desigual dos custos sanitários e ambientais que recaem desproporcionalmente sobre quem menos contribuiu para o problema. Essa dimensão de injustiça distributiva é, sob a perspectiva dos direitos humanos, o elemento mais crítico a examinar.

1.3 DINÂMICA NORMATIVA ATUAL: LEGISLAÇÃO, AUTORIZAÇÕES E O FOGO COMO INSUMO DE PRODUÇÃO

O regime jurídico do fogo no Brasil é resultado de sobreposição de instrumentos que avançaram de forma descontínua e que, até 2024, careciam de uma política integrada. O Código Florestal, Lei n.º 12.651/2012 (Brasil, 2012), proibiu o uso do fogo em vegetação nativa como regra geral, admitindo exceções mediante autorização do órgão ambiental competente para atividades agropastoris e silviculturais. Na prática, o sistema de autorização mostrou-se incapaz de cobrir o volume de queimadas realizadas: a Guia de Trânsito Animal (GTA) rastreia lotes bovinos, não animais individuais; o Sistema Brasileiro de Identificação e Certificação de Origem Bovina e Bubalina (SISBOV), sistema oficial de rastreabilidade do rebanho mantido pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) que identifica e acompanha individualmente os animais, da fazenda ao abate (Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA, 2025), de adesão voluntária e voltado sobretudo à exportação, alcança apenas cerca de 2% do rebanho nacional, da ordem de 4 milhões de cabeças em um efetivo de aproximadamente 238 milhões (IBGE, 2024a; MAPA, 2025); e os órgãos de fiscalização ambiental operam com efetivo insuficiente para um território de 5,2



milhões de quilômetros quadrados. O resultado foi um *gap* estrutural persistente entre a norma proibitiva e a capacidade de implementação, que, segundo Assunção *et al.* (2023), só foi parcialmente reduzido nos períodos em que o DETER (Detecção de Desmatamento em Tempo Real), também do INPE, que emite alertas diários de desmatamento e degradação para orientar a fiscalização, com finalidade de alerta rápido e não de medição oficial das taxas, foi ativamente utilizado para subsidiar operações de fiscalização, com estimativa de que o desmatamento entre 2007 e 2011 foi 75% menor do que teria sido sem essa integração.

Esse *gap* não é apenas institucional, mas também resultado da captura sistemática dos mecanismos de controle pelo crime ambiental organizado (Pereira; Perazzoni, 2024). A corrupção de agentes e órgãos públicos de fiscalização, documentada em operações como a Akuanduba, não é um elemento acessório do problema: é frequentemente o ponto de partida dos projetos criminosos que resultam nos grandes incêndios associados à grilagem e ao desmatamento ilegal. Nesse contexto, o fogo não é apenas uma ferramenta econômica, mas um instrumento de consolidação territorial de ocupações ilegais, cuja impunidade é estruturalmente garantida pela fragilidade dos sistemas de responsabilização.

O quadro regulatório foi reformulado a partir de 2024. A Lei n.º 14.944/2024, que institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF) (Brasil, 2024a), representa a mudança mais estrutural no marco normativo desde o Código Florestal de 2012. Um dos seus aspectos centrais reside no reconhecimento jurídico do uso prescrito e controlado do fogo como instrumento técnico legítimo de prevenção, deslocando-o da categoria de ilícito absoluto para a de atividade de risco sujeita a planejamento, autorização e controle administrativo. Essa mudança alinha a política pública brasileira a evidências técnico-ecológicas consolidadas segundo as quais o manejo preventivo da biomassa reduz significativamente a probabilidade de incêndios de grandes proporções (Perazzoni, 2025a).



Complementarmente, o Decreto n.º 12.189/2024 (Brasil, 2024b) promoveu endurecimento das sanções administrativas para incêndios dolosos, com a multa por hectare queimado dolosamente saltando para R$ 10.000, aumento superior a 300%, e com o embargo expandido para incluir bloqueio do acesso ao crédito rural subsidiado ao infrator identificado. A Advocacia-Geral da União ajuizou em janeiro de 2025 ação pleiteando R$ 725 milhões de responsáveis pelos incêndios do Pantanal de 2024, com base em laudos técnicos de georreferenciamento (Perazzoni, 2025b). Os focos registrados em agosto de 2025 totalizaram 18.451 (INPE, 2025b), queda de 73% em relação ao mesmo mês de 2024, resultado que sinaliza possível efeito dissuasório da nova legislação, embora a atribuição causal exclusiva a essa reforma requeira análise econométrica com controles climáticos.

A impunidade persistente tem também uma raiz propriamente política. Figueira (2004), ao analisar a questão do latifúndio e da impunidade no Brasil rural, documenta o que designa de crime endógeno ao Estado: situações em que a promiscuidade de autoridades com práticas ilegais, seja por envolvimento direto seja por conivência, torna a norma proibitiva estruturalmente incapaz de produzir responsabilização efetiva. No domínio das queimadas, esse fenômeno manifesta-se na captura seletiva dos mecanismos de controle pela chamada bancada ruralista no Congresso, que sistematicamente dificulta a aprovação e a implementação de legislação ambiental mais exigente, e na pressão política sobre órgãos de fiscalização em períodos eleitorais ou de maior incidência de incêndios. A consequência é que a lei existe, as sanções existem, os sistemas de monitoramento existem, e mesmo assim a impunidade persiste como dado empírico: o questionário desta pesquisa registrou percepção quase unânime, entre os grupos consultados, de que a responsabilização efetiva raramente ocorre.

Apesar dos avanços, as políticas existentes permanecem predominantemente reativas, respondendo a incêndios já ocorridos



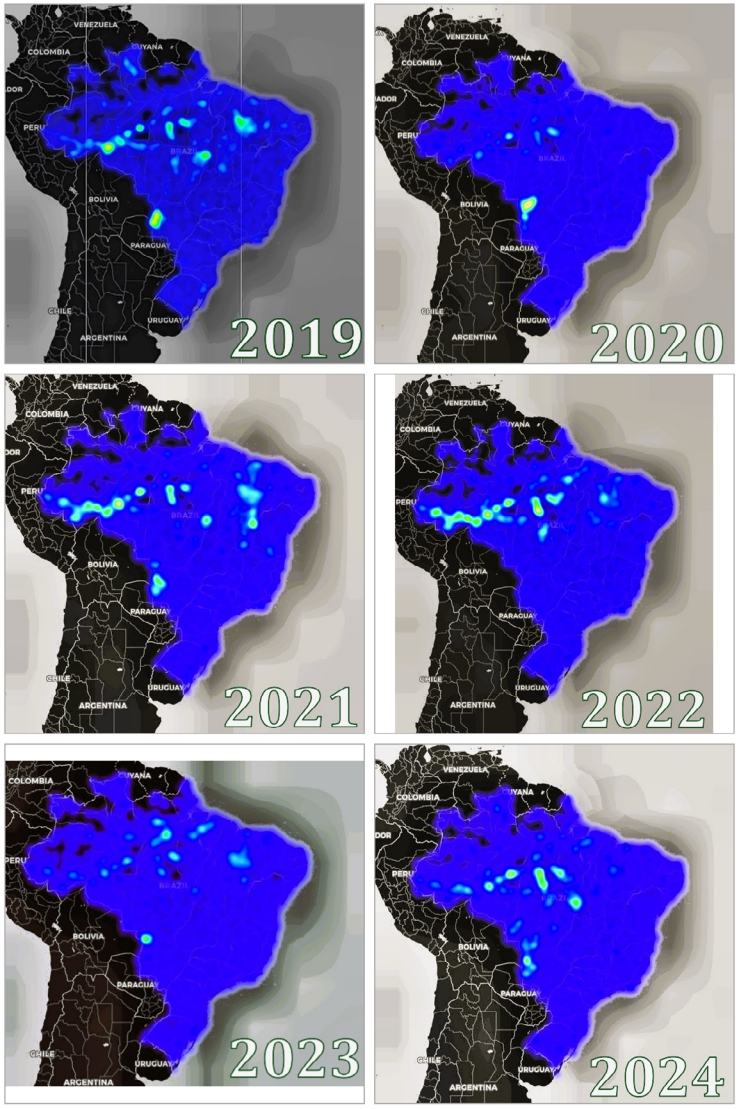
em vez de preveni-los sistematicamente. A integração entre sistemas de saúde e sistemas de monitoramento ambiental é incipiente: os protocolos de alerta sanitário não incorporam, de forma sistemática, dados de focos ou de área queimada como disparadores de ações preventivas. A efetividade plena da PNMIF depende de coordenação federativa, capacidade administrativa dos entes subnacionais, formação técnica das burocracias locais e existência de financiamento estável e previsível, condições que ainda não estão garantidas.

O contexto normativo não se esgota no direito interno. No plano transnacional, instrumentos regulatórios de mercado têm emergido como mecanismos complementares de pressão sobre as cadeias econômicas que alimentam o desmatamento e as queimadas e, lidos à luz dos Princípios Orientadores sobre Empresas e Direitos Humanos (ONU, 2011), funcionam como proteção transversal de direitos humanos, e do direito à saúde em particular, por via comercial. A análise desses instrumentos, e em particular do Regulamento Europeu sobre Produtos Livres de Desmatamento (EUDR) (União Europeia – UE, 2023), é desenvolvida no Capítulo 3, onde são examinadas as respostas ao problema identificado neste capítulo.

1.4 A TRÍADE ESTRUTURAL: PECUÁRIA, DESMATAMENTO E QUEIMADAS

Antes de examinar as relações estatísticas entre os componentes da tríade, convém caracterizar empiricamente o fenômeno do fogo. A distribuição espacial dos focos de incêndio entre 2019 e 2024 (Figura 2) concentra-se de forma inequívoca na Amazônia Legal e no arco de desmatamento, padrão que se repete em todos os anos da série.

Figura 2 – Mapa de calor da concentração dos focos de incêndio por ano (2019–2024)



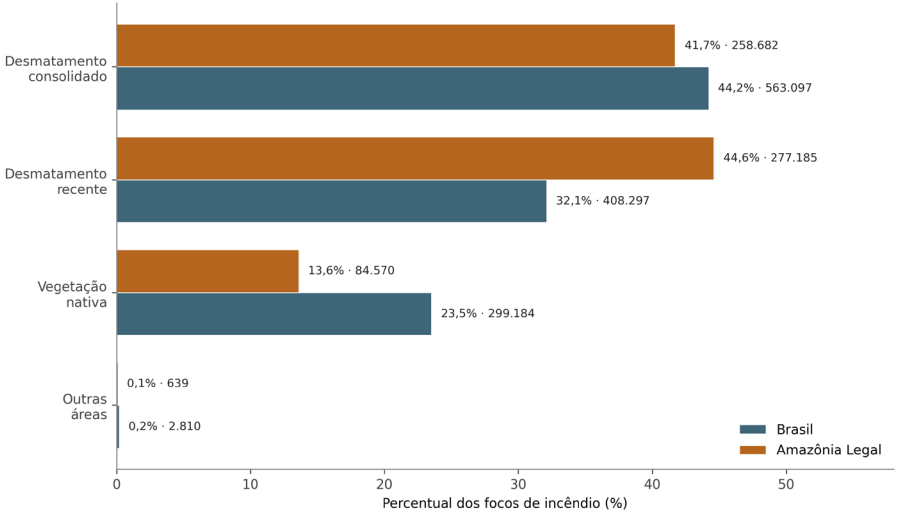
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do INPE (2025a).

Nota: A intensidade dos focos concentra-se sistematicamente na Amazônia Legal e no arco de desmatamento.



A natureza desses focos é reveladora. Classificados segundo o tipo de área em que ocorrem, os focos brasileiros concentram-se em áreas de desmatamento consolidado (44,2%) e recente (32,1%): mais de três quartos do fogo está associado ao manejo agropecuário e à abertura de novas áreas, e apenas 23,5% correspondem a incêndio em vegetação nativa (Figura 3). Na Amazônia Legal, o padrão é ainda mais acentuado, 86,3% dos focos ocorrem em áreas de desmatamento, recente ou consolidado, restando 13,6% em vegetação nativa. Os dados sustentam empiricamente a tese de que o fogo amazônico é, em sua maioria expressiva, de origem antrópica e associado à expansão da fronteira agropecuária.

Figura 3 – Classes de fogo por tipo de área no Brasil e na Amazônia Legal (jan/2019–dez/2024)



Fonte: elaboração própria a partir de dados do INPE (2025a e 2025c).

Nota: No Brasil predomina o fogo em áreas de desmatamento consolidado (44,2%); na Amazônia Legal, o de desmatamento recente (44,6%), sinal de fronteira ativa. Em ambos, o fogo em vegetação nativa é minoritário (23,5% no Brasil; 13,6% na Amazônia).



Antes da análise contemporânea, importa compreender o enraizamento histórico dessa relação. Como sistematiza Rossi (2025), com base em investigação jornalística reconhecida internacionalmente e em diálogo com historiadores especializados, o uso do gado como instrumento de ocupação territorial na Amazônia tem raízes que remontam ao próprio regime colonial. As sesmarias instituídas a partir de 1534 condicionavam a posse à produtividade exercida via agricultura e pecuária; quando improdutivas, retornavam à Coroa como "terras devolutas". Pela impossibilidade prática de Portugal organizar a posse em um território vasto, e particularmente após a suspensão da concessão de sesmarias pelo Tribunal do Desembargo do Paço em julho de 1822, sem que outra forma legal de aquisição tivesse sido determinada, a posse ilegal converteu-se na principal via de ocupação. A Lei de Terras de 1850 reorganizou formalmente o regime fundiário, mas o padrão histórico já estava estruturado: o gado, originalmente trazido pelos portugueses para tração nos engenhos de açúcar, tornou-se um meio de ocupar a terra que precedia frequentemente a chegada do título jurídico. A continuidade entre essa estrutura colonial e os padrões contemporâneos de grilagem, documentados pela Anistia Internacional (2020) e analisados pelo *Climate Policy Initiative* (Lima Filho *et al.*, 2021), integra o próprio diagnóstico: a expansão pecuária na Amazônia não é fenômeno recente nem desvio conjuntural, é a etapa atual de um continuum de cinco séculos de uso do gado como ferramenta de territorialização.

A literatura científica converge há décadas em identificar a pecuária extensiva como o motor proximal dominante do desmatamento e das queimadas amazônicas. Cerca de 60% das áreas desmatadas na Amazônia são convertidas em pastagem, o que faz da pecuária o principal vetor do desmatamento (Lapola *et al.*, 2014). A cadeia causal é direta: o crescimento do rebanho bovino gera demanda por pastagem; a pastagem requer terra; a terra mais barata está na fronteira florestal; e o desmatamento na fronteira é executado



predominantemente pelo fogo. Burgess *et al.* (2012) demonstraram que a intensidade desse processo responde a incentivos econômicos mensuráveis, como preço da carne, acesso ao crédito rural e densidade de fiscalização, o que sugere sua natureza racional e potencialmente responsiva a intervenções de política.

A presente pesquisa verificou essa relação com dados geoespaciais originais do período 2019–2024. A correlação de Pearson entre a intensidade da pecuária e as queimadas na Amazônia Legal foi de $r = 0{,}65$ ($p < 0{,}001$; $n = 772$ municípios), classificada como forte e alinhada à literatura. A correlação entre queimadas e desmatamento atingiu $r = 0{,}64$ ($p < 0{,}001$) e entre desmatamento e pecuária, $r = 0{,}44$ ($p < 0{,}05$). No conjunto do país, essa mesma correlação fogo-desmatamento aparece diluída ($r = 0{,}39$). Trata-se de artefato da cobertura do monitoramento: o produto de desmatamento (DETER/PRODES) cobre essencialmente a Amazônia e o Cerrado, de modo que municípios sem essa medida entram na análise como fogo sem desmatamento e rebaixam o coeficiente. Restrita à Amazônia Legal, onde fogo e desmatamento coexistem na fronteira, a correlação sobe para 0,64. Em sentido oposto, IDH e PIB não apresentaram correlação estatisticamente significativa com queimadas nas análises entre estados. Todas as correlações são bivariadas e não controlam confundidores; devem ser lidas como evidência exploratória que sustenta a hipótese, não como estimativa causal.

A análise econômica sobre os mecanismos por trás dessa associação contribui para refinar a interpretação. Estudo do *Climate Policy Initiative*/PUC-Rio (Lima Filho *et al.*, 2021) identifica que, fora da Amazônia, o crescimento da pecuária associa-se a aumentos do preço da terra, padrão característico de expansão por demanda alimentar; já na Amazônia, observa-se o oposto: cada 10% de aumento no rebanho bovino municipal associa-se a uma redução de cerca de 10% no preço da terra, padrão típico de expansão por aumento da



oferta via grilagem de terras públicas. A simetria invertida é metodologicamente reveladora: na Amazônia, o crescimento da pecuária parece estar fortemente relacionado à grilagem, processo que aumenta a oferta de terras e reduz seu preço ao mesmo tempo em que estimula a criação extensiva. A pecuária funciona, nesse padrão, menos como atividade econômica respondendo à demanda alimentar e mais como instrumento de consolidação territorial de áreas obtidas ilegalmente; o fogo é a ferramenta de conversão; o gado é o instrumento de ocupação fática e de posse simbólica e jurídica.

A documentação empírica desse padrão pela Anistia Internacional (2020), com base em dados oficiais da Agência de Defesa Sanitária Agrosilvopastoril do Estado de Rondônia (IDARON), obtidos via Lei de Acesso à Informação, é particularmente reveladora. Entre novembro de 2018 e abril de 2020, o número de bovinos em áreas protegidas de Rondônia onde a pecuária comercial é juridicamente proibida, incluindo a Terra Indígena Uru-Eu-Wau-Wau e as Reservas Extrativistas do Rio Jacy-Paraná e do Rio Ouro Preto, passou de 125.560 a 153.566, um aumento de 22% em dezoito meses. Em 2019, foram registradas 89.406 movimentações de bovinos provenientes de fazendas situadas nessas áreas. A investigação documenta ainda, a partir de Guias de Trânsito Animal (GTA), que parte desse gado foi transferido através de fazendas intermediárias legais antes de chegar a frigoríficos exportadores, prática conhecida como "lavagem de gado" que dá aparência de legalidade ao animal criado ilegalmente em áreas protegidas. As implicações em matéria de direitos humanos são diretas: povos indígenas e moradores tradicionais perderam acesso a parte de seus territórios, sofreram ameaças e, em casos documentados, foram expulsos por homens armados. O fogo, o desmatamento e a pecuária não constituem, nesse padrão, fenômenos sequenciais distintos: são fases articuladas de um único processo de violação progressiva de direitos.



O dado relevante, sob a ótica dos direitos humanos, não se resume ao número absoluto de focos, mas à exposição diferenciada de populações cuja proteção reforçada decorre de obrigações jurídicas específicas. Os padrões territoriais observados convergem com a literatura que identifica relação estrutural entre expansão agropecuária, desmatamento e uso do fogo, ao mesmo tempo em que permitem sua atualização empírica para o período analisado.

Essa dimensão de injustiça encontra suporte na doutrina do princípio da precaução. Aragão (2008, p. 41), no âmbito do direito ambiental europeu e português, identificou uma "infeliz coincidência entre a ocorrência geográfica dos riscos e a ocupação do solo por populações vulneráveis". No contexto amazônico, essa coincidência não é um acidente topográfico, mas o resultado histórico de décadas de políticas de colonização que direcionaram a expansão da fronteira agropecuária para territórios habitados pelas populações com menor capital político e menor acesso a serviços.

Tabela 1 – Tríade Estrutural: Correlações entre Pecuária, Desmatamento, Queimadas, IDH e PIB (2019–2024)

Par de Variáveis	r de Pearson	Valor-p	Nível inferencial
Queimadas x Pecuária	0,65	< 0,001	Forte (***)
Queimadas x Desmatamento	0,64	< 0,001	Forte (***)
Desmatamento x Pecuária	0,44	< 0,05	Moderada (*)
IDH x PIB	0,92	< 0,001	Muito forte (***)
Pecuária x IDH	0,17	> 0,05	Muito fraca, n.s.
Pecuária x PIB	0,16	> 0,05	Muito fraca, n.s.
Queimadas x PIB	–0,12	> 0,05	Muito fraca, n.s.
Desmatamento x PIB	–0,27	> 0,05	Fraca, n.s.
Queimadas x IDH	–0,28	> 0,05	Fraca, n.s.
Desmatamento x IDH	–0,33	> 0,05	Fraca, n.s.

Fonte: elaboração própria a partir de dados do INPE (2025a, 2025c), IBGE (2024a), PNUD et al. (2022) e MapBiomas (2024).

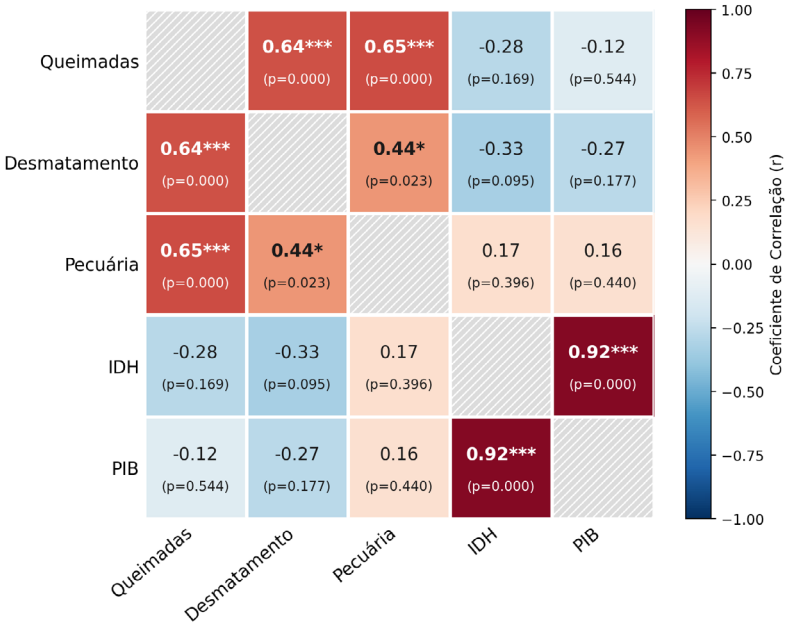


Nota Técnica 1.1, Metodologia das correlações. As correlações de Pearson (r) foram calculadas entre médias anuais municipais de 2019 a 2024 (n = 772 municípios da Amazônia Legal). Uma correlação foi considerada robusta quando satisfazia três critérios simultâneos: $|r| \geq 0{,}20$; valor-p $< 0{,}05$; e $n \geq 30$. A escala de interpretação adotada segue Cohen (1988): 0,20–0,39 = fraca; 0,40–0,59 = moderada; 0,60–0,79 = forte; ≥ 0,80 = muito forte. Todas as correlações são bivariadas e não controlam confundidores; devem ser lidas como evidência exploratória de associação, não como estimativas causais. A correlação pecuária × IDH ($r = 0{,}17$; $p > 0{,}05$) é estatisticamente não significativa e não permite qualquer inferência sobre a relação entre essas variáveis. Detalhamento das bases de dados no Apêndice A. Fonte: elaboração própria a partir de dados do INPE (2025a, 2025c); IBGE (2024a); PNUD *et al.* (2022); MapBiomas (2024).

A Figura 4, apresentada a seguir, exibe o mapa de calor das correlações entre as variáveis centrais da tríade estrutural, confirmando graficamente os padrões da Tabela 1. O par IDH-PIB apresenta correlação muito forte entre si ($r = 0{,}92$; $p < 0{,}001$), mas ambos se mostram estatisticamente dissociados das queimadas, evidenciando que os municípios que mais queimam não são os que mais se desenvolvem humanamente.



Figura 4 – Matriz de correlações de Pearson entre queimadas, rebanho bovino, desmatamento, IDH e PIB — Amazônia Legal (2019–2024)



*Significância: *** p<0.001 | ** p<0.01 | * p<0.05*

Tons de azul = correlações negativas | branco = neutro | tons de vermelho = correlações positivas

Cinza hachurado = autocorrelação (não aplicável)

Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a, 2025c), IBGE (2024a) e PNUD et al. (2022).

Nota: N = 772 municípios; *** p < 0,001; * p < 0,05. Azul = negativa; vermelho = positiva; cinza hachurado = autocorrelação.

O encadeamento da tríade pode ser sintetizado como um ciclo destrutivo (Figura 5). As correlações empíricas são consistentes com a hipótese de que cada elo da cadeia opera com intensidade significativa: a expansão pecuária prediz a expansão do desmatamento (r = 0,44) e o desmatamento prediz fortemente a ocorrência de fogo

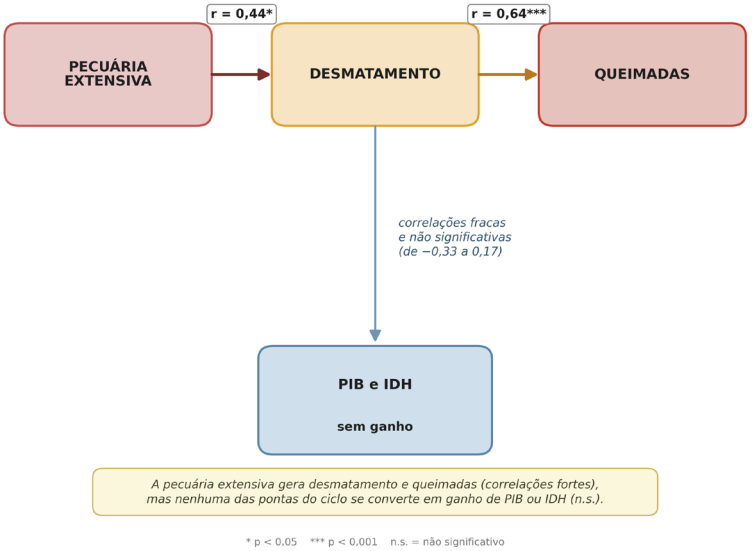


(r = 0,64). Contudo, esse ciclo não se converte em ganho mensurável: a correlação entre desmatamento e PIB é negativa (r = −0,27) e a correlação entre queimadas e IDH é igualmente negativa (r = −0,28). Os números invertem o argumento desenvolvimentista que historicamente legitimou a expansão da fronteira agropecuária amazônica.

A análise espacial aprofunda esse padrão e mostra o fogo como instrumento de apropriação territorial. Cruzando as cicatrizes de incêndio com os dados de desmatamento do PRODES na mesma área, verifica-se que os focos se concentram onde a pecuária já é intensa: os municípios com rebanho superior a dez mil cabeças respondem por 92,9% de todos os focos da Amazônia. Mais revelador é o comportamento por tipo de domínio fundiário. Em áreas públicas, o fogo precede o desmatamento em 62,2% dos casos, e a taxa de conversão de floresta queimada em desmatamento alcança 11,3%, o dobro dos 5,5% observados em áreas privadas. O fogo opera, assim, como o abre-alas da grilagem: desvaloriza a floresta em pé, sinaliza ocupação e prepara o terreno para a conversão posterior em pastagem, sobretudo em terras públicas ainda não destinadas. A janela temporal reforça a leitura: a conversão de área queimada em desmatamento sobe de 5,6% em três anos para 7,6% em cinco anos, o que indica que o monitoramento de curto prazo subestima o impacto real das queimadas e que a consolidação fundiária é processo deliberado e faseado. Esses padrões estão sintetizados nas Figuras 6 e 7.



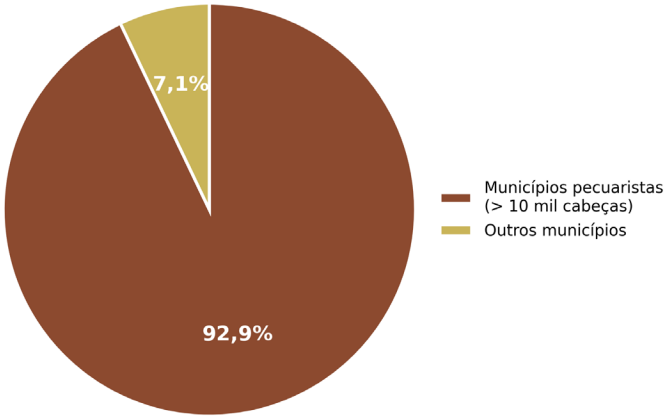
Figura 5 – Esquema conceitual do ciclo destrutivo da pecuária extensiva



Fonte: elaboração própria, a partir dos valores da Tabela 1.

Nota: A expansão pecuária associa-se ao desmatamento (r = 0,44; p < 0,05) e este às queimadas (r = 0,64; p < 0,001), mas nenhuma das pontas do ciclo se converte em ganho de PIB ou de IDH, cujas correlações com as três variáveis são fracas e não significativas (entre −0,33 e 0,17).

Figura 6 – Concentração dos focos de incêndio da Amazônia em municípios pecuaristas

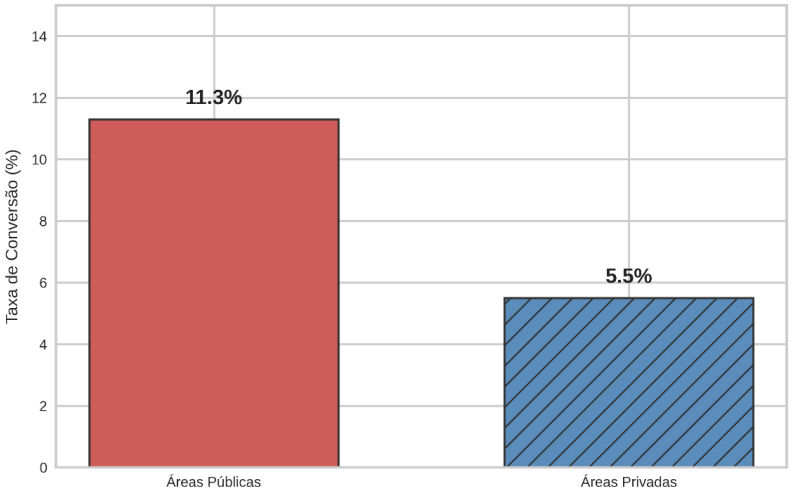


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do INPE (2025a) e do IBGE (2024a).

Nota: Os municípios com rebanho superior a dez mil cabeças respondem por 92,9% do total.



Figura 7 – Taxa de conversão de floresta queimada em desmatamento em cinco anos

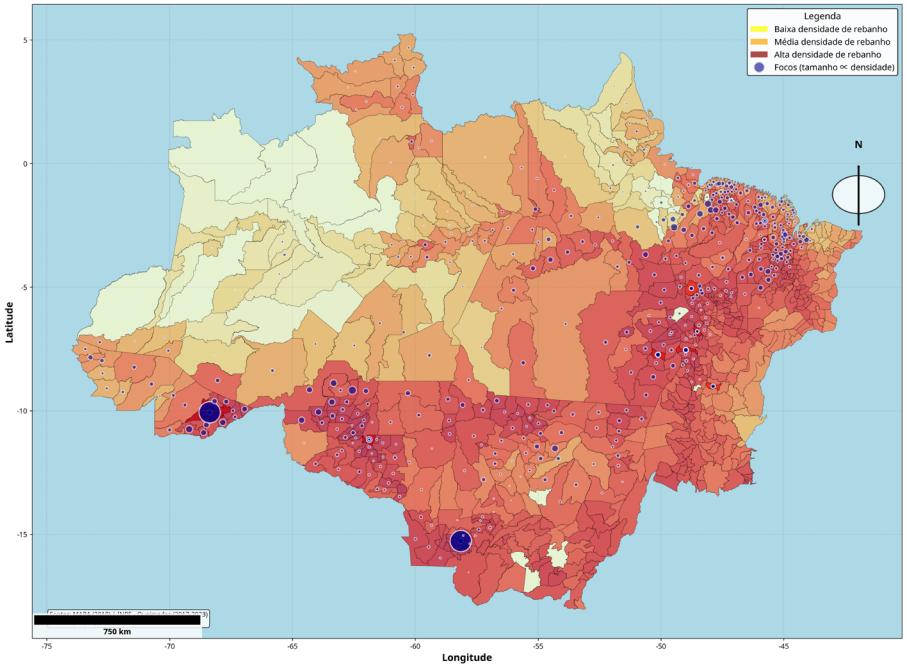


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do INPE (2025a, 2025c); IBGE (2024a); MapBiomas (2024); FUNAI (2024) e INCRA (2024).

Nota: Áreas públicas (11,3%) apresentam conversão 2x mais intensa que áreas privadas (5,5%).

A distribuição espacial desse ciclo é igualmente reveladora. A Figura 8 sobrepõe a densidade do rebanho bovino à densidade de focos de incêndio na Amazônia Legal entre 2017 e 2023, documentando visualmente a coincidência territorial: as mesorregiões do arco sul-leste, Rondônia, Mato Grosso, sul do Pará e Tocantins, concentram simultaneamente a maior densidade pecuária e a maior densidade de focos.

Figura 8 – Densidade de rebanho bovino (tons de castanho) e focos de incêndio (círculos azuis, tamanho proporcional à densidade) sobrepostos na Amazônia Legal, 2017–2023



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do IBGE (2024a) e do INPE (2025a).

Nota: As mesorregiões do arco sul-leste concentram simultaneamente a maior densidade pecuária e a maior densidade de focos.

O resultado combinado dessas correlações documenta o padrão de externalização que a literatura de justiça ambiental há décadas descreve: os benefícios econômicos da pecuária extensiva são concentrados por proprietários rurais, frigoríficos e cadeias exportadoras; os custos ambientais e sanitários, a poluição do ar, as doenças respiratórias, a sobrecarga hospitalar e a degradação de recursos hídricos, recaem sobre a população local. Essa estrutura de distribuição assimétrica de ganhos e perdas configura o que



Acselrad *et al.* (2009) denominam injustiça distributiva: não é um efeito colateral inevitável do desenvolvimento, mas o resultado de escolhas políticas e institucionais que sistematicamente privilegiam interesses econômicos concentrados sobre o bem-estar difuso.

Sob a perspectiva dos direitos humanos, esse padrão tem implicações jurídicas concretas. O Comentário Geral n.º 14 do Comitê de Direitos Econômicos, Sociais e Culturais, que interpreta o art. 12 do Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais (PIDESC), estabelece quatro critérios para a realização do direito à saúde: disponibilidade, acessibilidade, aceitabilidade e qualidade (Moreira; Gomes, 2013). A disponibilidade de serviços de saúde em municípios com alta incidência de queimadas é estruturalmente comprometida pela própria dinâmica de expansão agropecuária que produz os incêndios; a acessibilidade é reduzida pela distância e pelo isolamento geográfico; e a qualidade dos serviços disponíveis é insuficiente para absorver picos sazonais de demanda associados às queimadas. Esses déficits acumulados constituem violação progressiva do direito à saúde, com endereço territorial preciso e causas estruturais identificáveis.

O princípio do poluidor-pagador, sistematizado por Aragão (2014) como instrumento de eficiência econômica e de justiça distributiva, exige precisamente que os custos sanitários decorrentes das queimadas não sejam transferidos ao erário público e às populações afetadas, mas internalizados por quem se beneficia economicamente das atividades que as produzem. A operacionalização desse princípio pressupõe a capacidade de quantificar os danos sanitários com metodologia auditável, necessidade que o modelo analítico descrito no Capítulo 3 busca endereçar.



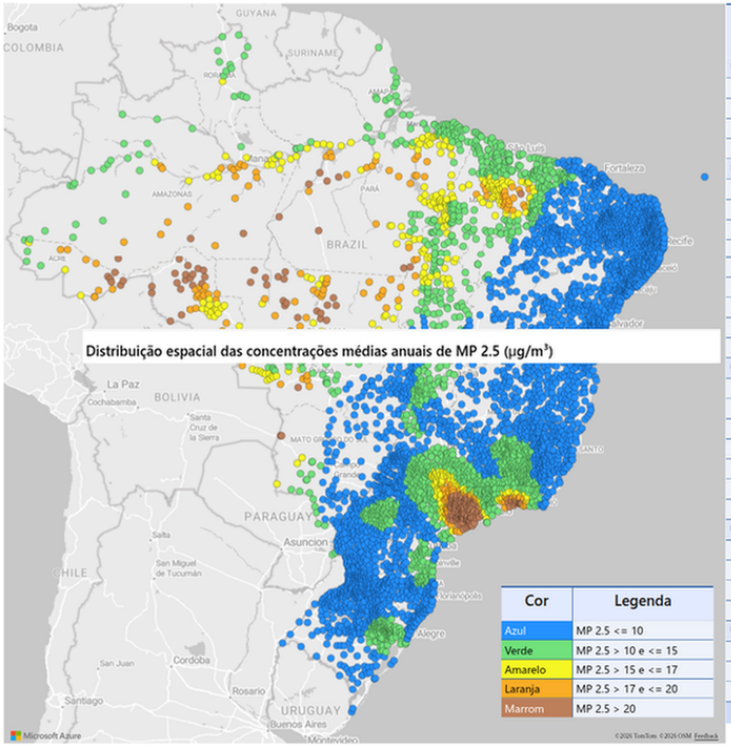
1.5 DISTRIBUIÇÃO TERRITORIAL E DESIGUALDADES SOCIOECONÔMICAS

A concentração geográfica dos incêndios é uma das características mais importantes do problema e uma das mais subestimadas no debate público. Vinte municípios da Amazônia Legal respondem por cerca de 35% dos focos nacionais. Essa concentração não é aleatória: ela reflete a estrutura fundiária, a pressão do agronegócio de fronteira e a fragilidade dos sistemas de fiscalização nesses territórios.

As correlações entre queimadas e IDH municipal ($r = -0{,}28$) e entre pecuária e IDH ($r = 0{,}17$) são fracas e estatisticamente não significativas ($p > 0{,}05$). Ainda assim, lidas em conjunto, são conceitualmente reveladoras de um padrão de externalização: a atividade que produz mais incêndios não se traduz em mais desenvolvimento humano nos municípios onde ocorre. A combinação das dimensões ambiental e de desenvolvimento humano produz um *ranking* de estados problemáticos (Figura 10) em que oito dos dez primeiros lugares são ocupados por unidades federativas da Amazônia Legal, evidenciando que a concentração territorial do problema é simultânea: ambiental e socioeconômica.

Essa desigualdade territorial manifesta-se também na qualidade do ar. A concentração média de PM2.5 à superfície é mais elevada na região Norte, 15,12 $\mu g/m^3$, contra 8 a 11 nas demais regiões, com Amazonas (17,27) e Rondônia (17,98) no topo, exatamente onde se concentram os focos (Figura 9). Esses dados, de caráter ilustrativo e oriundos do programa VIGIAR (Ministério da Saúde, 2023), dão a medida espacial do problema; a análise quantitativa da relação entre exposição e desfechos de saúde, no Capítulo 2, baseou-se em dados do Copernicus (CAMS), de melhor resolução.

Figura 9 – Concentração média anual de PM2.5 à superfície (µg/m³), por unidade federativa



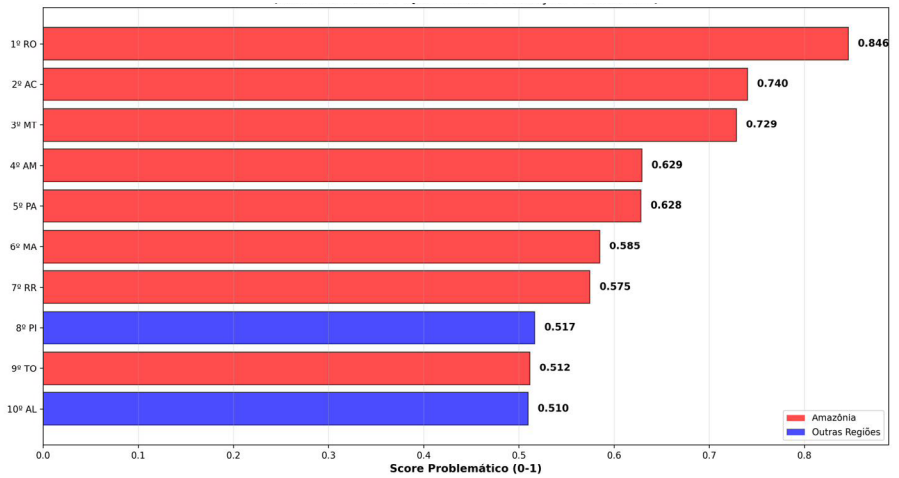
Região	Média de MP 2.5
Centro-Oeste	11.47
DF	12.79
GO	9.53
MS	9.78
MT	15.80
Nordeste	8.61
AL	7.10
BA	6.11
CE	8.90
MA	14.28
PB	8.79
PE	7.77
PI	9.58
RN	8.55
SE	6.28
Norte	15.72
AC	18.12
AM	16.22
AP	13.05
PA	15.50
RO	20.61
RR	13.95
TO	14.02
Sudeste	11.98
ES	7.72
MG	9.74
RJ	14.03
SP	15.16
Sul	9.30
PR	9.64
RS	9.13
SC	9.13
Total	10.58

Fonte: Ministério da Saúde (2023).

Nota: Dado ilustrativo, de série descontinuada; a região Norte registra a média mais alta.



Figura 10 – Índice composto de vulnerabilidade (desmatamento + queimadas + PM2.5 + baixo IDH), por estado



Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a, 2025c), CAMS (2024) e PNUD et al. (2022).

Nota: Estados de maior índice: Rondônia (0,846), Acre (0,740), Mato Grosso (0,729), Amazonas (0,629), Pará (0,628), Maranhão (0,585), Roraima (0,575), Piauí (0,517), Tocantins (0,512) e Alagoas (0,510).

A Corte Interamericana de Direitos Humanos, na Opinião Consultiva OC-23/17 de 2017, articulou expressamente que populações em situação de vulnerabilidade merecem proteção especial em matéria ambiental. Os dados desta pesquisa fornecem a base empírica para tornar esse princípio concreto no contexto amazônico: a vulnerabilidade não é abstrata, é mensurável em focos por quilômetro quadrado, em distâncias a Unidades de Terapia Intensiva (UTIs), em taxas de mortalidade infantil e em custos ao SUS. Significa também que estratégias focalizadas nos 20 municípios mais críticos têm potencial de impacto desproporcional em relação ao seu custo, argumento com implicações diretas para alocação de recursos de vigilância e de saúde.



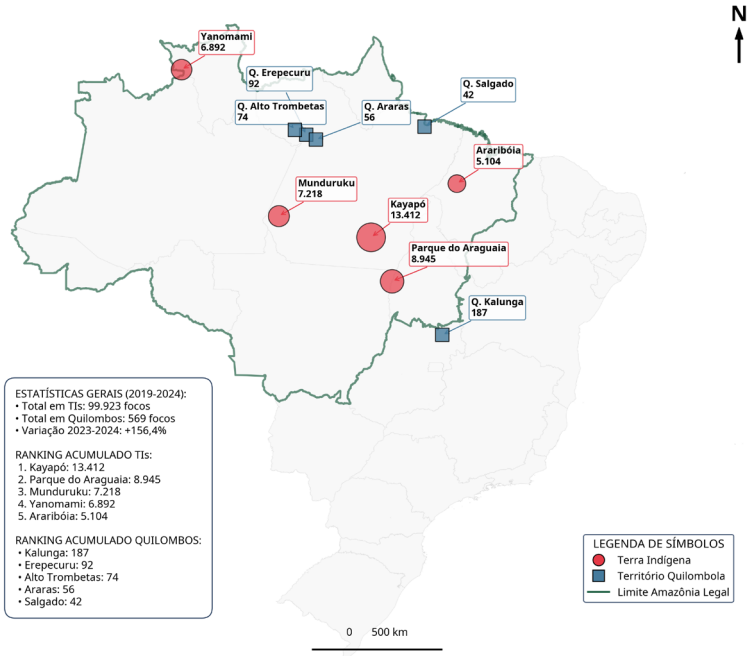
1.6 TERRAS INDÍGENAS E TERRITÓRIOS QUILOMBOLAS: PROTEÇÃO RELATIVA E PRESSÃO EXTERNA DO FOGO

A análise geoespacial conduzida com metodologia ponto-em-polígono cruzou os focos registrados pelo INPE com os polígonos de 638 Terras Indígenas homologadas e 94 Territórios Quilombolas no período 2019–2024. Os resultados revelam duas métricas complementares que capturam dimensões distintas da pressão do fogo sobre territórios indígenas. A primeira, mais estrita, contabiliza os focos detectados diretamente dentro dos polígonos das TIs pela metodologia ponto-em-polígono: 99.923 focos no período, correspondendo a 7,85% do total nacional de 1.273.473 focos, afetando 210 etnias distribuídas por 430 municípios. A segunda métrica, geograficamente mais ampla, contabiliza os focos em municípios que contêm pelo menos uma TI, unidade relevante porque a fumaça e os efeitos ecológicos do fogo não respeitam os limites dos polígonos: 178.104 focos, correspondendo a 26,6% dos focos da Amazônia Legal. São, portanto, dois recortes distintos que não devem ser confundidos: a métrica estrita mede o fogo dentro do território indígena, ao passo que a ampla mede o fogo em todo o município que o abriga, área muito maior, o que explica o número mais alto. Em ambas as métricas, o padrão sazonal é idêntico: pico entre julho e outubro, com máximo em agosto, 64,4% dos focos em TIs concentram-se nos meses de agosto e setembro, coincidindo com a estação seca e com a janela de maior atividade da grilagem e do desmatamento de fronteira. O ano de 2024 registrou aumento de 156% nos focos em TIs relativamente a 2023, com pico mensal de 14.306 focos em setembro. A evolução anual está apresentada na Tabela 2. Nos desfechos de saúde registrados nos municípios com TIs, 55,3% dos casos são do sexo feminino, padrão que se repete em todas as categorias diagnósticas e que se alinha a hipóteses sobre a maior permanência das mulheres no território durante os períodos de fogo.



A análise geoespacial identifica as Terras Indígenas com maior incidência de focos no período, tomando como unidade de análise o próprio polígono de cada TI. Entre as mais atingidas: Kayapó/PA (13.412 focos), Parque do Araguaia/TO (8.945), Munduruku/PA (7.218), Yanomami/RR-AM (6.892) e Araribóia/MA (5.104). A sobreposição geográfica entre os estados com maior pressão agropecuária e aqueles com maior incidência de focos em TIs é coerente com a hipótese de que a expansão do arco do desmatamento constitui o principal vetor de risco para os territórios indígenas. A Figura 11 representa cartograficamente essa distribuição por Terra Indígena, com os cinco territórios mais críticos identificados. Quando a unidade de análise passa do polígono da TI para o município que a contém, as contagens e o ordenamento mudam; essa leitura municipal é apresentada na Figura 13.

Figura 11 – Focos de incêndio por Terra Indígena (unidade: polígono da TI), 2019–2024 — cinco territórios mais atingidos em destaque



Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a), FUNAI (2024), INCRA (2024) e IBGE (2024a).

Nota: Métrica estrita (dentro dos polígonos): 99.923 focos em TIs e 569 em quilombolas; a leitura por município é a da Figura 13.



Tabela 2 – Evolução Anual dos Focos de Incêndio em Terras Indígenas (2019–2024)

Ano	Total Brasil	Focos em TIs	% em TIs	Focos Quilombos	Var. TIs (%)
2019	197.632	16.807	8,50%	89	- (base)
2020	222.797	16.499	7,41%	125	–1,8%
2021	184.314	11.411	6,19%	87	–30,8%
2022	200.761	13.646	6,80%	77	+19,6%
2023	189.669	11.661	6,15%	100	–14,6%
2024	278.300	29.899	10,74%	91	+156,4%
TOTAL	1.273.473	99.923	7,85%	569	-

Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a), FUNAI (2024), INCRA (2024) e IBGE (2024a).

Nota Técnica 1.2, Metodologia ponto-em-polígono e distinção de métricas. Esta pesquisa utiliza duas métricas complementares para quantificar a exposição de Terras Indígenas ao fogo. (1) Focos dentro dos polígonos das TIs (métrica estrita): metodologia ponto-em-polígono em Python 3.11 com biblioteca GeoPandas, *datum* WGS84. Foram utilizados: (a) os focos do BDQueimadas (INPE, 2025a) de 2019 a 2024, filtrados por qualidade de detecção ≥ 50%; (b) os polígonos de 638 Terras Indígenas homologadas segundo base FUNAI vigente em 31/12/2024; (c) os polígonos de 94 Territórios Quilombolas titulados segundo base INCRA vigente em 31/12/2024. Um foco foi atribuído a uma TI quando sua coordenada geográfica caía dentro do polígono correspondente. Sobreposições de polígonos foram tratadas com regra de prioridade por área de interseção. A variação percentual de 2024 vs. 2023 deve ser interpretada com cautela: o ano de



2024 foi influenciado pelo El Niño intenso de 2023–2024, o que impede a atribuição exclusiva do aumento a fatores antrópicos. Detalhamento nas especificações metodológicas do Apêndice A. Fonte: elaboração própria a partir de dados do INPE (2025a), INCRA (2024) e FUNAI (2024).

Do lado da proteção relativa: as Terras Indígenas cobrem 14,2% do território nacional e apresentam densidade de 0,082 focos/km² no período, inferior à média nacional. Esse diferencial reforça a hipótese de que o manejo territorial indígena, que inclui práticas de uso controlado do fogo, vigilância comunitária e proteção jurídica dos territórios, contribui para reduzir a ocorrência de incêndios. Prist *et al.* (2023) quantificaram essa contribuição: florestas em Terras Indígenas absorvem anualmente cerca de 27% do PM2.5 captado por todas as áreas protegidas do Brasil, prevenindo mais de 15 milhões de casos de doenças respiratórias e cardiovasculares por ano, com valor econômico estimado em aproximadamente US$ 2 bilhões. Esse dado inverte o enquadramento habitual do debate: as Terras Indígenas não são apenas zonas de vulnerabilidade que requerem proteção estatal, são infraestruturas de saúde coletiva que toda a sociedade brasileira tem interesse direto em preservar.

Esse enquadramento encontra respaldo direto na doutrina internacional dos direitos humanos. A Declaração das Nações Unidas sobre os Direitos dos Povos Indígenas (DNUDPI), adotada pela Assembleia-Geral em 2007 (ONU, 2007), reconhece o direito dos povos indígenas a manter e fortalecer sua relação espiritual com a terra que tradicionalmente possuem ou habitam. A Organização Internacional do Trabalho (OIT), por meio da Convenção n.º 169 de 1989 (Organização Internacional do Trabalho – OIT, 1989), estabelece obrigações específicas dos Estados de consultar e proteger essas

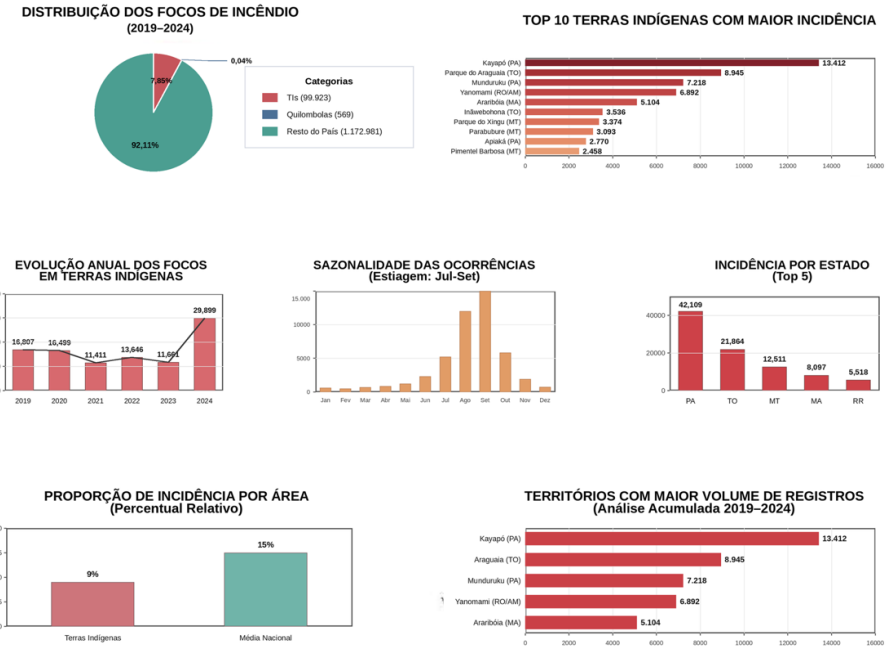


populações frente a ameaças que comprometam suas condições de vida e saúde. Moreira e Gomes (2013) sublinham que esses instrumentos expressam a interdependência entre direito à saúde, direitos territoriais e não discriminação: a violação de um implica, sistematicamente, a erosão dos demais.

O pico de 156,4% nos focos em Terras Indígenas em 2024, registrado em contexto de queda do desmatamento, indica que os incêndios em territórios protegidos respondem a fatores que vão além da fronteira agropecuária convencional: invasões, garimpo ilegal, pressão de madeireiros, disputas fundiárias ativas e o alastramento de incêndios originados em propriedades limítrofes. Essa dimensão de criminalidade ambiental organizada dirigida especificamente contra territórios indígenas e quilombolas constitui um padrão estrutural da experiência brasileira, no qual a violência é instrumento de dominação territorial que ocorre em primeiro plano, desde o início, como forma de expropriação das populações tradicionais (Pereira; Perazzoni, 2024).

A magnitude integral do fenômeno é sintetizada na Figura 12: foram identificados 100.492 focos de incêndio em territórios protegidos no período 2019–2024, sendo 99.923 em Terras Indígenas e 569 em Territórios Quilombolas. A evolução interanual mostra deterioração progressiva, com pico de 29.899 focos em 2024, o maior valor da série, e a sazonalidade concentra-se no período seco amazônico, entre julho e setembro. Os cinco estados com mais focos são Pará (42.109), Tocantins (21.864), Mato Grosso (12.511), Maranhão (8.097) e Roraima (5.518).

Figura 12 – Focos em territórios protegidos (2019–2024): distribuição, *ranking*, evolução interanual, sazonalidade e *Top* 5 estados

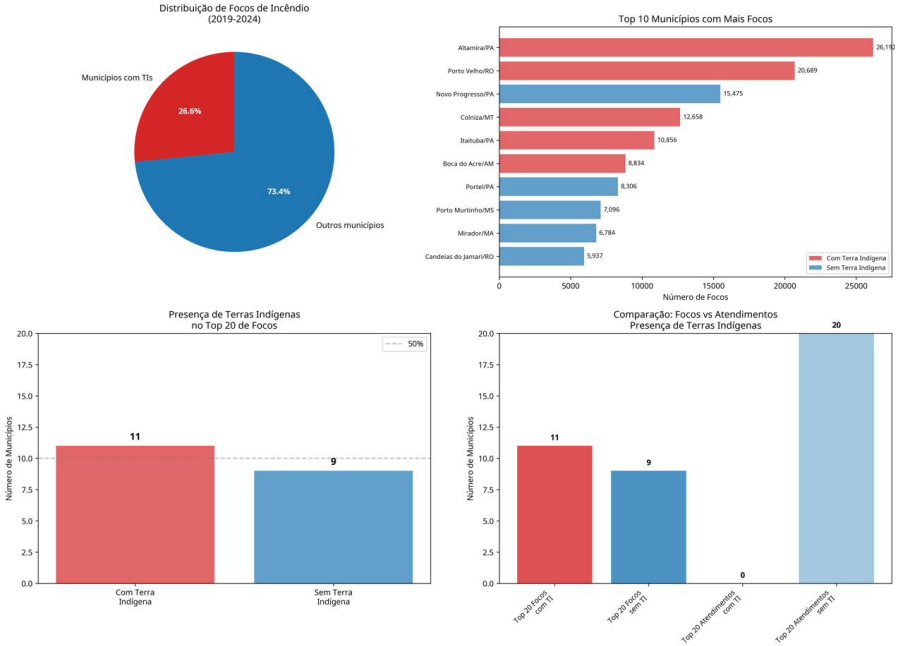


Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a), FUNAI (2024) e INCRA (2024).

Nota: Painéis (a) TIs (99.923) vs quilombolas (569); (b) áreas mais afetadas; (c) evolução anual; (d) sazonalidade; (e) estados.

O contraste entre exposição e acesso aos serviços de saúde fica visível quando se cruzam os *rankings* municipais (Figura 13): dos vinte municípios com mais focos de incêndio entre 2019 e 2024, onze possuem Terras Indígenas declaradas, mas nenhum dos vinte municípios com mais atendimentos de saúde no SUS possui TI declarada. É a expressão municipal da assimetria entre exposição e cobertura assistencial que se aprofundará no Capítulo 2: os territórios mais expostos ao fogo são precisamente os mais distantes da rede de atendimento.

Figura 13 – Focos por município que contém Terra Indígena (2019–2024) vs municípios com mais atendimentos de saúde



Fonte: elaboração própria, a partir de INPE (2025a), FUNAI (2024), INCRA (2024) e Ministério da Saúde (2024c).

Nota: 178.104 focos (26,6% da Amazônia Legal); maiores: Altamira/PA (26.192) e Porto Velho/RO (20.689). Onze dos 20 municípios mais queimados possuem TI declarada; nenhum dos 20 com mais atendimentos possui.

1.7 SÍNTESE: INCÊNDIOS, DESIGUALDADE E VULNERABILIDADE TERRITORIAL

Os resultados apresentados neste capítulo demonstram que os incêndios florestais na Amazônia não podem ser compreendidos apenas como eventos ambientais ou climáticos. Sua ocorrência está



associada a processos históricos de ocupação territorial, expansão agropecuária, desmatamento e fragilidades institucionais que, em conjunto, moldam a distribuição espacial do fogo e dos seus impactos.

A associação consistente entre pecuária, desmatamento e queimadas reforça evidências já consolidadas na literatura e confirma que o fogo permanece integrado à dinâmica econômica da fronteira amazônica. A crise observada em 2024 representou a manifestação mais visível dessas pressões estruturais, amplificadas por condições climáticas adversas, mas não explicadas exclusivamente por elas. Da mesma forma, os avanços normativos recentes, em especial a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo e o Decreto n.º 12.189/2024, constituem progresso relevante para a governança ambiental, embora sua efetividade dependa da capacidade de implementação, coordenação federativa, fiscalização e financiamento estável.

Os dados analisados também evidenciam que os impactos do fogo não se distribuem de forma homogênea pelo território. Municípios mais expostos aos incêndios tendem a apresentar maiores fragilidades socioeconômicas e institucionais, enquanto Terras Indígenas e outros territórios tradicionalmente protegidos desempenham papel relevante na contenção do desmatamento, dos incêndios e de seus efeitos associados. Nesse contexto, os incêndios revelam-se não apenas um problema ambiental, mas também uma questão de desigualdade territorial, proteção de direitos e justiça ambiental. Há, nesse padrão, um traço que merece destaque: a degradação ambiental associada ao avanço pecuário não se traduz em ganho proporcional de bem-estar para os territórios que a suportam, pois a associação entre pecuária e Índice de Desenvolvimento Humano mostrou-se estatisticamente não significativa (seção 1.4). Trata-se, portanto, de um modelo de ocupação que externaliza custos ambientais e sanitários sobre as populações locais sem lhes devolver desenvolvimento na mesma medida.

Se este capítulo procurou explicar por que os incêndios ocorrem e onde seus efeitos tendem a concentrar-se, o capítulo seguinte examina como essa exposição se traduz em adoecimento, vulnerabilidade sanitária e custos para o sistema de saúde.



2

O FOGO QUE ADOECE:

EXPOSIÇÃO, ADOECIMENTO E VULNERABILIDADE



O Capítulo 1 documentou por que os incêndios ocorrem: uma combinação de lógica econômica da fronteira agropecuária, fragilidade dos sistemas de fiscalização e desigualdade territorial que concentra a exposição ao fogo exatamente sobre as populações com menor capacidade de se proteger e de se recuperar. A pergunta que este capítulo responde é a consequência direta desse diagnóstico: o que acontece com a saúde das pessoas que vivem onde o fogo queima?

A resposta não é simples, porque o fogo não prejudica a saúde de uma só forma nem ao mesmo tempo. Há doenças que surgem enquanto a fumaça ainda está no ar, outras que aparecem semanas depois, e outras que só se manifestam meses mais tarde, quando as queimadas já saíram das notícias e a fumaça sumiu do céu. Há doenças que afetam quem respira a fumaça diretamente, e outras que chegam por caminhos que não são imediatamente óbvios, como o deslocamento de animais peçonhentos para perto de onde as pessoas moram, após a destruição do seu habitat natural pelo fogo. E há, finalmente, o problema de que os sistemas de monitoramento disponíveis não são igualmente adequados em toda parte: um dos achados mais relevantes desta pesquisa é que, na Amazônia, o indicador que a ciência normalmente usa para medir o risco sanitário das queimadas, a concentração de material particulado fino no ar, capta mal o que está acontecendo na região, por razões que dizem respeito às características do próprio ambiente amazônico.

Este capítulo percorre esses achados passo a passo. Começa pelo referencial teórico que sustenta a análise, o paradigma do *One Health*. Explica as fontes de dados utilizadas e a lógica metodológica adotada. Apresenta o problema do PM2.5 na Amazônia e o que ele implica para os sistemas de alerta. Descreve os padrões temporais de impacto encontrados, com suas diferenças entre a Amazônia e o restante do Brasil. Examina a infraestrutura hospitalar disponível para responder a esses impactos. Articula o conceito de tríplice vulnerabilidade amazônica. E conclui com uma estimativa do custo financeiro



que esses impactos representam para o sistema público de saúde. Em cada etapa, o esforço é conectar os dados a seus significados concretos para a vida das pessoas e para as obrigações do Estado em matéria de direitos humanos.

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO: A ABORDAGEM *ONE HEALTH*

A questão de como o fogo afeta a saúde humana exige partir de um pressuposto que a medicina convencional nem sempre reconhece com suficiente clareza: a saúde das pessoas não pode ser separada da saúde dos ecossistemas em que elas vivem. Um incêndio florestal não é apenas um evento que produz fumaça e irrita as vias respiratórias. É uma perturbação profunda em um sistema complexo, que altera a qualidade do ar, destrói o habitat de animais, desequilibra populações de insetos e vetores de doenças, contamina corpos d'água e afeta a saúde mental das comunidades que perdem seu entorno natural. Nenhuma dessas consequências pode ser entendida isoladamente.

É por isso que este capítulo adota o referencial do *One Health*, ou Saúde Única, paradigma reconhecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) que parte da premissa de que a saúde humana, a saúde animal e a integridade dos ecossistemas são interdependentes e precisam ser geridas de forma integrada. Esse referencial não é apenas uma escolha metodológica: é, também, um enquadramento de direitos humanos. A Organização Mundial da Saúde, desde o preâmbulo de sua Constituição de 1946, define saúde como um estado de completo bem-estar físico, mental e social, e não apenas ausência de doença (Moreira; Gomes, 2013). Essa definição ampla implica que o direito à saúde, reconhecido no



art. 12 do Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais (PIDESC), não pode ser cumprido sem atenção às condições ambientais em que as pessoas vivem.

Concretamente, os incêndios amazônicos afetam a saúde humana por três vias principais. A primeira é a via atmosférica: a inalação do material particulado fino (PM2.5) emitido pelas queimadas está associada à inflamação das vias aéreas e ao aumento do risco cardiovascular (Burnett *et al.*, 2018). Vale registrar desde já, porque isso condiciona as escolhas metodológicas desta pesquisa, que as estimativas de PM2.5 por reanálise apresentam limitações como *proxy* estatístico bruto no contexto amazônico por razões descritas na seção 2.3. A segunda é a via ecológica: quando o fogo destrói florestas, elimina também os animais que controlam naturalmente as populações de insetos e outros vetores de doenças, como aves insetívoras, morcegos e anfíbios. Sem esses predadores, populações de mosquitos, carrapatos e outros artrópodes crescem de forma descontrolada, aumentando a transmissão de doenças (Keesing *et al.*, 2010). A terceira é a via de deslocamento: animais peçonhentos como serpentes e escorpiões, cujo habitat é alterado pelo desmatamento e pelo avanço urbano, ampliando o contato com as populações humanas e elevando o risco de acidentes (Alcântara *et al.*, 2018; Fan *et al.*, 2015). Cada uma dessas vias tem um horizonte temporal diferente: os efeitos respiratórios aparecem em dias; os cardiovasculares, em semanas; os zoonóticos e os acidentes com peçonhentos, em meses. É essa estrutura temporal que este capítulo documenta empiricamente.

O referencial *One Health* tem, ainda, uma implicação prática direta para a política pública: ele exige que os sistemas de vigilância epidemiológica, monitoramento ambiental e saúde animal funcionem de forma integrada. O que os dados a seguir mostram é que, no Brasil, essa integração ainda é incipiente, e que os sistemas de alerta disponíveis captam apenas parte do problema.



2.2 FONTES DE DADOS E METODOLOGIA: COMO SE MEDE O IMPACTO DO FOGO NA SAÚDE

Medir o impacto das queimadas sobre a saúde é mais difícil do que parece. O fogo não assina o atestado de internação. Não aparece como causa de morte nos registros hospitalares. Para identificar sua influência, é preciso cruzar dois tipos de dados que normalmente vivem em sistemas separados: de um lado, os dados ambientais que registram onde e quando o fogo queimou; de outro, os dados de saúde que registram onde e quando as pessoas adoeceram. A pergunta que se faz é: há padrões sistemáticos de associação entre os dois? E, se há, com que defasagem temporal eles aparecem? O detalhamento das bases utilizadas, dos critérios de tratamento e do ambiente computacional consta do Apêndice A.

Para responder a isso, esta pesquisa utilizou três fontes de dados ambientais. A primeira foi o sistema BDQueimadas (INPE, 2025a), que registra a localização e a data de focos de calor detectados por satélite em todo o território nacional, com atualização diária. A segunda foi o MapBiomas Fogo – Coleção 4, que calcula mensalmente a área queimada em quilômetros quadrados por município (MapBiomas, 2024). A terceira foi o serviço CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*), operado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF) no âmbito do Programa Copernicus, que estima a concentração de material particulado fino (PM2.5) à superfície por reanálise atmosférica, em base municipal (CAMS, 2024). Essas três fontes representam formas distintas de medir a presença do fogo: os focos capturam a intensidade pontual dos incêndios; a área queimada captura a extensão



territorial do dano; e o PM2.5 captura o nível de poluição atmosférica resultante. A distribuição espacial desses indicadores por unidade federativa, em leitura exploratória e complementar, é ilustrada no Apêndice D (Figuras D.1 a D.4), que reúne ainda um mapa da incidência de internações respiratórias; a análise inferencial que sustenta os resultados foi conduzida, contudo, em nível municipal, mais fino, pelas razões expostas adiante.

Para os dados de saúde, foram utilizados dois sistemas do DATASUS, que é o banco de dados do Sistema Único de Saúde: o Sistema de Informações Ambulatoriais (SIA-SUS), que registra atendimentos ambulatoriais, e o Sistema de Informações Hospitalares (SIH-SUS), que registra internações (Ministério da Saúde, 2024c). Os dados foram coletados por município e por mês, de janeiro de 2019 a dezembro de 2024, e organizados em nove categorias de doenças segundo a Classificação Internacional de Doenças (CID-10): doenças cardiovasculares, respiratórias, infecciosas e zoonoses, picadas de animais peçonhentos, doenças oculares e de vias aéreas superiores, doenças psicológicas e mentais, dermatológicas, doenças relacionadas à qualidade do ar e uma categoria residual. Todos os números foram normalizados por 100.000 habitantes, para que fosse possível comparar municípios de tamanhos muito diferentes.

Esta investigação tem natureza exploratória e interdisciplinar. O objetivo desta seção não é produzir demonstração causal definitiva, mas identificar padrões temporais consistentes entre variáveis ambientais e desfechos de saúde que, considerados em conjunto, são compatíveis com efeitos sanitários relevantes e justificam aprofundamento analítico posterior. As associações observadas devem ser lidas como padrões temporalmente consistentes com hipóteses epidemiológicas plausíveis, e não como atribuição causal definitiva.



Uma distinção conceitual prévia é necessária para a correta interpretação dos resultados desta seção. Os três indicadores de exposição ambiental utilizados, focos de incêndio, área queimada e PM2.5, não são intercambiáveis. Cada um captura uma dimensão distinta do fenômeno. Os focos de incêndio (INPE, 2025a) são uma *proxy* da frequência e atividade térmica dos eventos, medem onde e quando o fogo ocorre. A área queimada (MapBiomas Fogo – Coleção 4) é uma *proxy* da magnitude territorial acumulada, mede a extensão do território afetado. O PM2.5 (CAMS/Copernicus, por reanálise atmosférica) é uma *proxy* atmosférica indireta, mede a concentração de partículas finas, que depende não apenas da intensidade do fogo, mas das condições meteorológicas de dispersão. Os três são complementares: as suas correlações com desfechos de saúde distintos fornecem informação sobre os mecanismos subjacentes. Uma associação mais forte com focos do que com PM2.5, por exemplo, sugere que a frequência dos eventos (não apenas a exposição cumulativa às partículas) pode ter papel relevante em determinados desfechos, o que tem implicações diretas para os sistemas de alerta e resposta.

A lógica analítica adotada combinou duas abordagens complementares, detalhadas na seção 2.4. A primeira, estritamente descritiva, examina a sazonalidade mensal de cada categoria de doença, o calendário sanitário do fogo, sobrepondo-a às curvas de focos e de área queimada, sem qualquer pretensão causal e com finalidade de planejamento assistencial. A segunda, inferencial, recorre a um modelo de painel com efeitos fixos de município e de tempo, que remove a sazonalidade e controla variáveis climáticas, de modo a isolar o que pode ser atribuído à exposição ao fogo acima do que a estação do ano, por si só, já explicaria. A análise foi conduzida separadamente para a Amazônia Legal e para o restante do Brasil porque, como se verá, os resultados diferem substancialmente nos dois contextos.



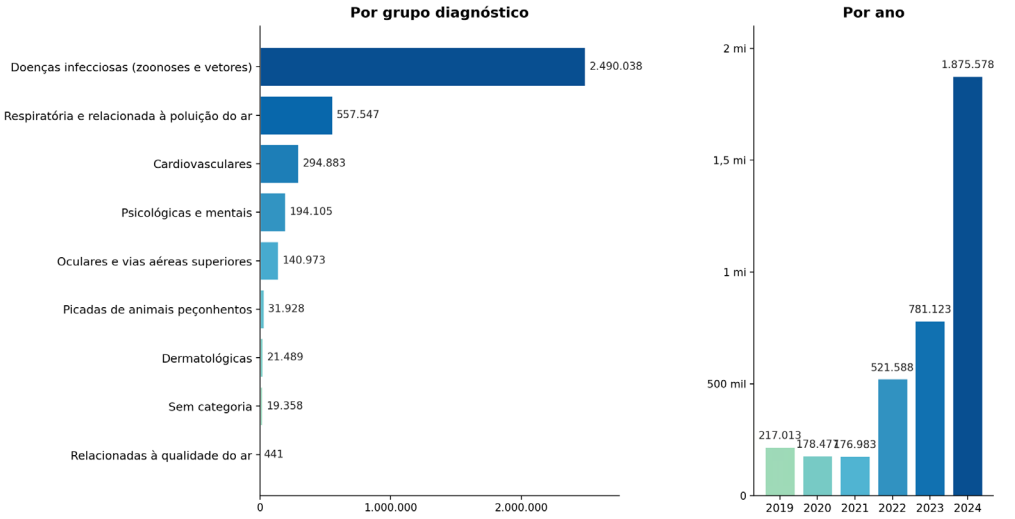
Convém ser claro sobre o que esse tipo de análise pode e não pode afirmar. O que ela mostra são correlações estatísticas, não relações de causalidade estabelecidas. Dizer que há correlação forte entre queimadas e um determinado tipo de internação algumas semanas ou meses depois não é o mesmo que indicar que as queimadas causaram aquelas internações: podem existir outros fatores, não medidos nessa análise, que influenciam os dois fenômenos simultaneamente. A limitação é conhecida e reconhecida. O que as correlações fornecem é evidência consistente de que existe uma relação a ser investigada com métodos mais rigorosos, como o modelo de painel com efeitos fixos descrito no Capítulo 3, que avança em direção à inferência causal.

Uma última nota sobre a cobertura temporal das diferentes bases mobilizadas neste capítulo. A análise epidemiológica e econômica baseada em dados do SIH-SUS cobre o período 2019–2024, último ano com base consolidada à data de extração. A análise complementar dos atendimentos prestados pela Secretaria Especial de Saúde Indígena (SESAI), apresentada na seção 2.6, cobre o período 2020–2025, em razão da disponibilidade pública dos painéis anuais do Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígena (SIASI). O subperíodo sobreposto 2020–2024 constitui o núcleo temporal comum entre as duas análises, com os anos não comuns funcionando como extensões pertinentes, 2019 para o referencial pré-pandêmico no SIH-SUS, 2025 para o registro do período pós-emergência Yanomami no SIASI.

Antes de analisar as associações entre fogo e saúde, importa dimensionar o universo de dados processado. Entre 2019 e 2024, foram contabilizados cerca de 3,75 milhões de atendimentos ambulatoriais nas categorias diagnósticas sensíveis à exposição ao fogo, distribuídos de forma muito desigual entre os tipos de doença e com forte crescimento a partir de 2022 (Figura 14).



Figura 14 – Atendimentos ambulatoriais por grupo diagnóstico e por ano (2019–2024)



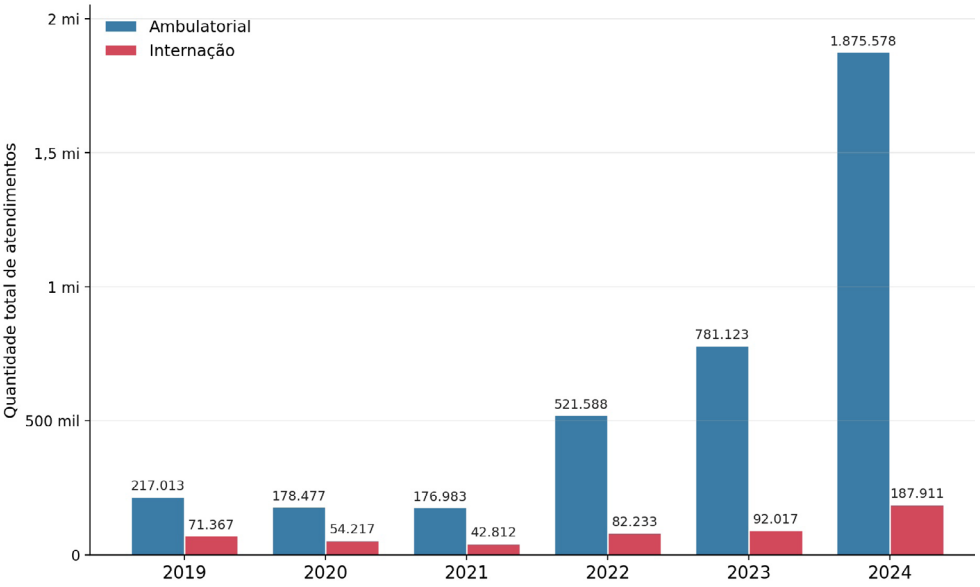
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: Total de 3.750.762 registros.

Considerando conjuntamente atendimentos ambulatoriais e internações (Figura 15), observa-se o mesmo padrão de aceleração: o volume anual de atendimentos ambulatoriais passa de cerca de 217 mil em 2019 para mais de 1,87 milhão em 2024, enquanto as internações crescem de 71 mil para 188 mil no mesmo intervalo. Um aspecto chama a atenção: o ano de 2024, isoladamente, concentrou cerca de metade de todos os atendimentos ambulatoriais do período, praticamente igualando a soma dos cinco anos anteriores (2019–2023), salto coerente com a intensidade dos focos registrados nesse ano.



Figura 15 – Total de atendimentos ambulatoriais e internações por ano (2019–2024)



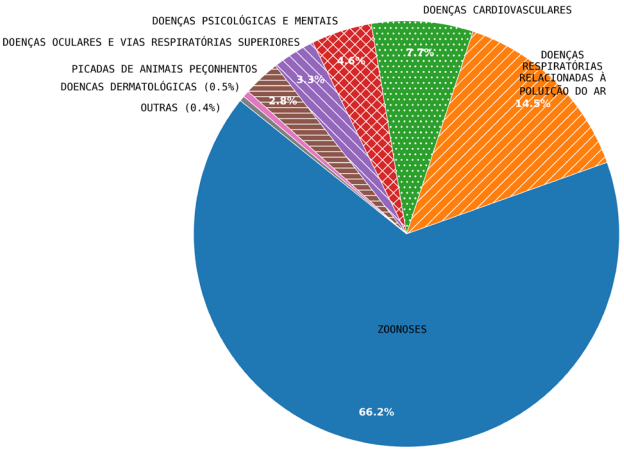
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: 2024 concentrou cerca de metade de todos os atendimentos ambulatoriais do período, praticamente igualando a soma dos cinco anos anteriores (2019–2023).

A composição por grupo diagnóstico (Figura 16) é dominada pelas doenças infecciosas, zoonoses e transmitidas por vetores, que respondem por 66,2% dos atendimentos, seguidas pelas doenças respiratórias relacionadas à qualidade do ar (14,5%) e pelas cardiovasculares (7,7%). A evolução temporal por grupo (Figura 17) mostra que esse predomínio das infecciosas se acentua a partir de 2022, padrão cuja relação com a defasagem temporal em relação aos focos é examinada nas seções seguintes.



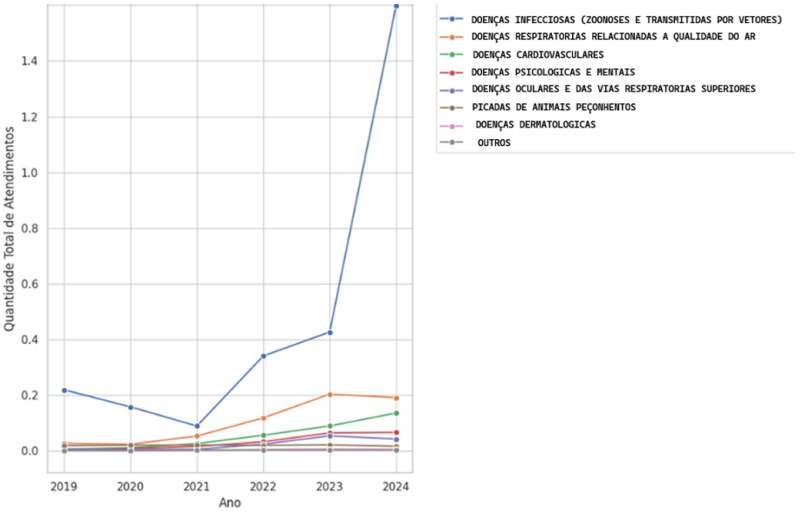
Figura 16 – Distribuição dos atendimentos por grupo diagnóstico (2019–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: Zoonoses e infecciosas (66,2%), respiratórias relacionadas à poluição do ar (14,5%), cardiovasculares (7,7%).

Figura 17 – Evolução anual dos atendimentos por grupo diagnóstico (2019–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: Destaque para a curva de doenças infecciosas, zoonoses e transmitidas por vetores.



2.3 O PROBLEMA DO PM2.5 NA AMAZÔNIA: QUANDO O TERMÔMETRO NÃO MEDE BEM A FEBRE

Antes de apresentar os resultados, é necessário discutir um achado metodológico que condiciona toda a interpretação dos dados amazônicos: o material particulado fino (PM2.5), indicador padrão em epidemiologia ambiental para avaliar o impacto sanitário de queimadas, tem desempenho limitado como *proxy* estatístico bruto na Amazônia. No restante do Brasil ele se comporta bem, mas na Amazônia Legal sua correlação média bivariada com os desfechos de saúde foi de apenas 0,089, muito abaixo da correlação média da área queimada (0,341) e dos focos de incêndio (0,298).

Esse resultado pode parecer surpreendente: se o PM2.5 é a partícula que causa os danos, por que não mede bem o problema na Amazônia? A resposta tem duas camadas. A primeira é a natureza do indicador: o PM2.5 aqui utilizado provém da reanálise do CAMS, que combina observações de satélite com um modelo atmosférico e, por isso, oferece cobertura completa mesmo sob a densa nebulosidade amazônica, exatamente a principal fragilidade dos produtos puramente satelitais. Ainda assim, a reanálise herda as limitações dos dados de satélite que assimila e de modelos calibrados sobretudo para contextos urbanos de clima temperado (van Donkelaar *et al.*, 2010); somam-se a isso a sua resolução espacial relativamente grossa, da ordem de 80 km, que suaviza as plumas locais de fumaça, e a escassez de estações de solo na região para restringir as estimativas. A segunda camada é a forma de leitura: a correlação de 0,089 é bivariada e calculada em escala estadual-mensal, na qual o efeito local e defasado da fumaça se dilui na média da unidade federativa, um problema de agregação, e não apenas de medida.



Isso não significa que o PM2.5 não cause danos à saúde na Amazônia: a biologia é a mesma em qualquer lugar e a literatura científica global sobre os efeitos respiratórios e cardiovasculares do material particulado é sólida (Pope; Dockery, 2006; Burnett *et al.*, 2018). O que significa é que o PM2.5 da reanálise, lido de forma bruta e agregada, não captura bem esses efeitos na Amazônia, ao passo que os focos do INPE e a área queimada do MapBiomas, indicadores mais diretos da presença do fogo, mostram correlações brutas substancialmente mais altas com os desfechos de saúde na Amazônia Legal. Essa limitação, porém, é do sinal bruto: como se verá na seção 2.4.2, o painel municipal com efeitos fixos e defasagens recupera, a partir do mesmo PM2.5 do CAMS, um efeito cardiovascular forte e robusto na Amazônia (+25,5%), de modo que a ressalva se mantém sobretudo para a via respiratória e para o uso do PM2.5 como gatilho simples de alerta.

> Nota Técnica 2.1, Sistemas de Alerta Sanitário baseados em PM2.5. *Cabe um registro metodológico sobre as fontes de material particulado. Os dados de superfície do programa VIGIAR, que ofereciam um panorama da concentração de PM2.5 (apresentado no Capítulo 1), foram descontinuados em 2023; além disso, cobriam poucos pontos de coleta e não eram disponibilizados em formato adequado à análise quantitativa. Por essa razão, a análise desta seção recorreu ao Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), de melhor resolução espacial. Independentemente da fonte, a literatura confirma que as queimadas no Cerrado e na Amazônia são fontes significativas de emissões de PM2.5, associadas a doenças respiratórias e cardiovasculares e a mortes prematuras (Mataveli et al., 2019, 2021; Butt et al., 2020; Reddington et al., 2015; Ignotti et al., 2010).*



2.4 O CALENDÁRIO DO FOGO E O IMPACTO AGUDO SOBRE A SAÚDE

A análise da relação entre o fogo e a saúde organiza-se, neste estudo, em torno de duas perguntas distintas, que exigem métodos distintos e não devem ser confundidas. A primeira é descritiva e de utilidade imediata para a gestão: em que meses do ano cada tipo de adoecimento aumenta? A segunda é inferencial: o aumento observado é atribuível ao fogo, acima daquilo que a estação do ano, por si só, já explicaria? A primeira pergunta orienta a alocação de recursos, quando pré-posicionar leitos, equipes, antiveneno e campanhas de vigilância. A segunda fundamenta a responsabilização, se há um excedente de adoecimento que se possa imputar especificamente às queimadas.

Essa distinção corrige uma limitação das abordagens correlacionais simples. Séries de fogo e de adoecimento compartilham um forte ciclo sazonal: ambas se intensificam na estação seca. Uma correlação calculada sobre os dados brutos confunde, portanto, a coincidência dos ciclos com uma eventual relação de causa, e tende a superestimar a associação. Por essa razão, a leitura desenvolvida a seguir separa explicitamente as duas dimensões: a seção 2.4.1 documenta a sazonalidade dos agravos, o calendário sanitário do fogo, sem qualquer pretensão causal; a seção 2.4.2 submete a hipótese de atribuição a um modelo de painel com efeitos fixos, que remove a sazonalidade e controla o clima, isolando o que pode ser atribuído à exposição.



2.4.1 O CALENDÁRIO SANITÁRIO: A SAZONALIDADE DOS AGRAVOS

Antes de testar qualquer relação causal, importa descrever quando, ao longo do ano, cada desfecho de saúde se intensifica. A Figura 18 apresenta, para o conjunto do Brasil, a climatologia mensal de cada categoria diagnóstica (média de 2019 a 2024, padronizada em índice de 0 a 100) sobreposta à curva mensal de focos de incêndio e de área queimada. A Figura 19 estende a comparação às três regiões (Brasil, Amazônia Legal e Resto do Brasil), e a Tabela 3 sintetiza, por série, o mês de pico, o mês de vale e a amplitude sazonal.

O padrão que emerge é o de um calendário sanitário escalonado, organizado em torno do pico do fogo, que ocorre em setembro nas três regiões. Na Amazônia Legal, dois desfechos acompanham de perto esse calendário. As doenças cardiovasculares mantêm-se em patamar baixo de janeiro a junho (índice de incidência em torno de 1,0 por 100 mil habitantes) e saltam para 3,9 em julho, 3,6 em agosto e atingem o pico de 4,1 em setembro, exatamente o mês de maior incidência de focos, recuando para 0,8 já em novembro. É uma quadruplicação da demanda cardiovascular concentrada na janela do fogo, seguida de retorno ao nível basal. As doenças oculares e das vias aéreas superiores seguem o mesmo desenho, com pico em setembro.

O contraste regional reforça a leitura. No Resto do Brasil, esses mesmos desfechos têm comportamento sazonal muito mais discreto e deslocado no tempo: o pico cardiovascular ocorre em outubro, um mês depois do pico do fogo, e a amplitude sazonal é de apenas 0,51, contra 1,81 na Amazônia, mais que o triplo. Esse deslocamento do pico, que adianta para setembro justamente onde o fogo é mais intenso, é sugestivo: se o aumento cardiovascular decorresse



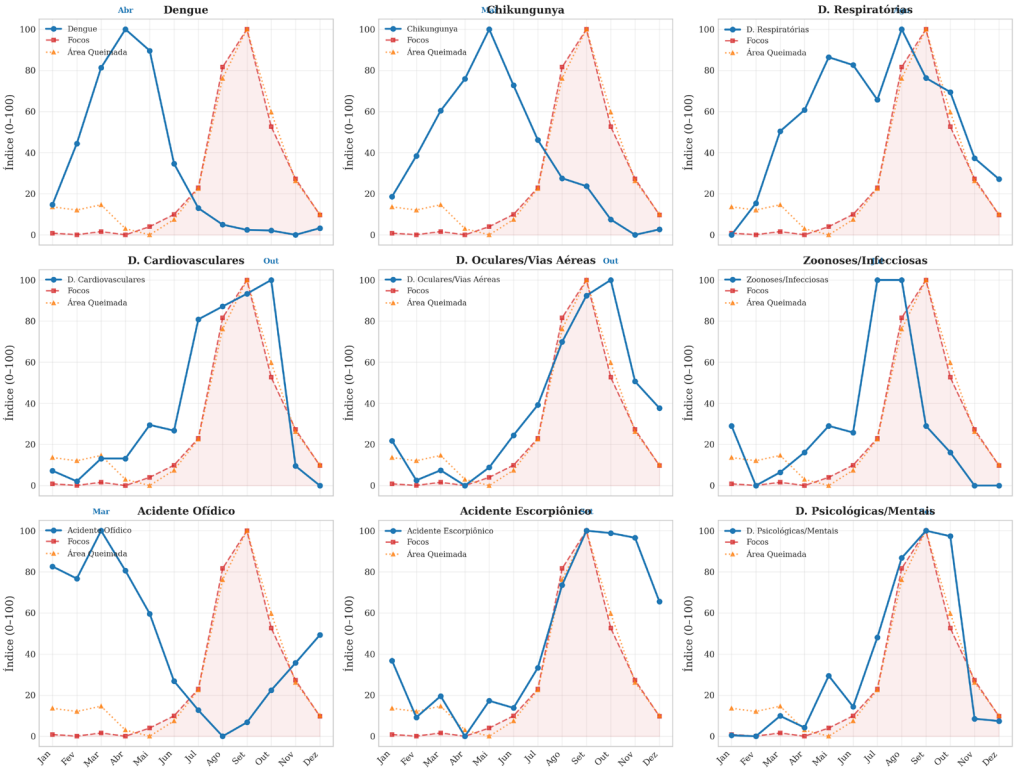
apenas de fatores gerais da estação, como a circulação sazonal de vírus, esperar-se-ia o mesmo mês de pico nas duas regiões. Não é o que se observa. A coincidência temporal não prova causa, mas indica onde e quando agir.

É necessário ser explícito quanto aos limites dessa leitura, e quanto aos desfechos que não se ajustam ao calendário do fogo. As doenças respiratórias, contrariando a intuição, atingem o pico em maio na Amazônia, antes do auge das queimadas, e em agosto no Resto do Brasil, padrão compatível com a circulação de vírus respiratórios no período frio e seco, e não com a fumaça. A dengue e a chikungunya seguem o ciclo das chuvas, com pico em abril e maio, em sazonalidade oposta à do fogo. O acidente ofídico concentra-se no verão chuvoso (janeiro a março), quando a atividade das serpentes é máxima. A sazonalidade de um desfecho de saúde tem, portanto, múltiplos determinantes além do fogo (clima, vetores, calendário agrícola, fluxo de notificação), e a coincidência entre o pico do fogo e o pico de um agravo é sugestiva, não probatória. Distinguir a parcela atribuível especificamente às queimadas exige remover o efeito sazonal e controlar confundidores, tarefa da seção 2.4.2.

Essa leitura é coerente com o referencial *One Health* adotado neste capítulo. O fogo não atua sobre uma única via de adoecimento: reorganiza o sistema ambiental (qualidade do ar, recursos hídricos, habitat de fauna e vetores, deslocamento de populações) e dessa reorganização emergem agravos distintos, em janelas temporais distintas. O calendário sanitário é a expressão observável dessa cadeia ecológica: não uma soma de relações isoladas entre o fogo e cada doença, mas a assinatura temporal de uma perturbação sistêmica única.



Figura 18 – Sazonalidade mensal dos desfechos de saúde versus exposição a incêndios (Brasil, climatologia 2019–2024)

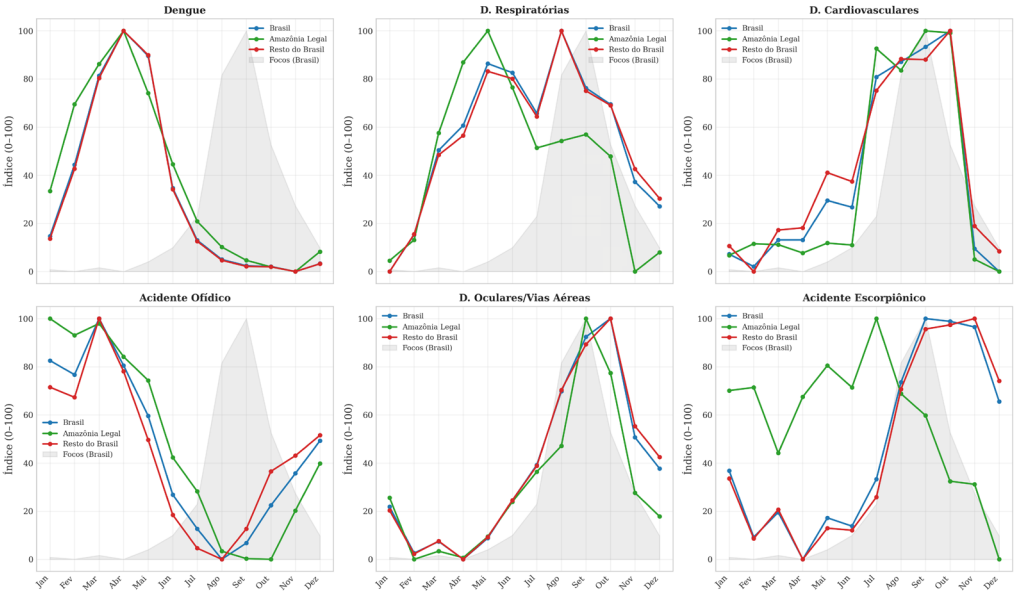


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do MapBiomas (2024).

Nota: Índice padronizado (0–100); curvas de cada desfecho sobrepostas às de focos e área queimada.



Figura 19 – Comparação regional da sazonalidade: Brasil, Amazônia Legal e Resto do Brasil



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do MapBiomas (2024).

Nota: Índice padronizado 0–100, climatologia 2019–2024, com a curva de focos do Brasil ao fundo. Nas doenças cardiovasculares, o pico desloca-se para setembro na Amazônia (coincidindo com o fogo) e para outubro no Resto do Brasil.

Tabela 3 – Mês de pico, mês de vale e amplitude sazonal das principais séries, por recorte regional (climatologia mensal, 2019–2024)

Série	Pico Brasil	Pico Amazônia	Pico Resto	Amplitude Amazônia	Amplitude Resto
Focos de incêndio	Set	Set	Set	3,42	3,08
Área queimada	Set	Set	Set	2,42	2,26
Cardiovasculares	Out	Set	Out	1,81	0,51
Oculares/vias aéreas	Out	Set	Out	1,16	0,91
Respiratórias	Ago	Mai	Ago	0,70	0,83
Dengue	Abr	Abr	Abr	1,92	2,66



Série	Pico Brasil	Pico Amazônia	Pico Resto	Amplitude Amazônia	Amplitude Resto
Zoonoses/infecciosas	Jul	Mai	Jul	0,94	0,67
Acidente ofídico	Mar	Jan	Mar	0,61	0,85

Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do MapBiomas (2024).

2.4.2 DO CALENDÁRIO À ATRIBUIÇÃO: O PAINEL MUNICIPAL DE EFEITOS FIXOS

A coincidência sazonal descrita acima sugere, mas não demonstra, um efeito do fogo. Para testar a atribuição foi estimado um modelo de painel com efeitos fixos, em nível municipal, cobrindo 5.542 municípios em base mensal de 2019 a 2024. A escolha do nível municipal é deliberada: análises em nível estadual, conduzidas em etapa anterior desta pesquisa, diluíam o efeito local da fumaça na média da unidade federativa e produziam associações instáveis, por vezes de sinal invertido, um artefato típico de estudos ecológicos em unidades espaciais demasiado amplas. O modelo emprega estimação de Poisson por pseudomáxima verossimilhança (técnica apropriada para modelar dados de contagem, como o número de internações), com efeitos fixos de município (que absorvem características permanentes, como infraestrutura de saúde e perfil socioeconômico) e efeitos fixos de ano-mês (que absorvem a sazonalidade nacional e choques como a pandemia). Inclui ainda controles de temperatura e precipitação, e a exposição é medida por três indicadores padronizados (focos, PM2.5 e área queimada), com defasagens de zero a três meses. Os resultados são reportados como razões de taxas de incidência (IRR) por aumento de um desvio-padrão na exposição. Convém explicitar a chave de leitura desses números, para quem não esteja familiarizado com eles: a IRR exprime quantas vezes a taxa de internação se altera com a exposição, de modo que uma IRR de 1,255 corresponde a um aumento de 25,5% e uma IRR igual a 1,0 indica



ausência de efeito; o desvio-padrão é apenas a unidade em que a exposição é medida, e o efeito lê-se como o acréscimo associado a um aumento típico de fumaça; e o valor-p indica a probabilidade de o resultado ter surgido por acaso, sendo tanto mais robusto quanto menor ($p < 0{,}001$ corresponde a menos de uma chance em mil).

O achado mais robusto é a associação entre material particulado fino (PM2.5) e internações por doenças cardiovasculares. No conjunto do Brasil, cada aumento de um desvio-padrão no PM2.5 associa-se a um acréscimo de 10,9% nas internações cardiovasculares, com defasagem de um mês (IRR = 1,109; $p = 0{,}002$). Na Amazônia Legal, o efeito é substancialmente maior: +25,5% (IRR = 1,255; $p < 0{,}001$). De fato, o efeito permanece praticamente inalterado quando os controles climáticos são incluídos, o que indica que não é um artefato da estação seca, e desaparece no Resto do Brasil, coerente com a hipótese de que a exposição ao PM2.5 das queimadas amazônicas é qualitativamente distinta, em intensidade e duração, da exposição observada em outras regiões. A magnitude estimada para a Amazônia é notavelmente próxima da relatada por Requia *et al.* (2021) para a Região Norte, o que confere validação externa ao resultado. As Figuras 20 e 21 apresentam, respectivamente, o panorama dos efeitos por indicador e o destaque do achado cardiovascular; a Tabela 4 reúne os efeitos estatisticamente significativos para o Brasil e a Tabela 5 sintetiza o contraste regional.

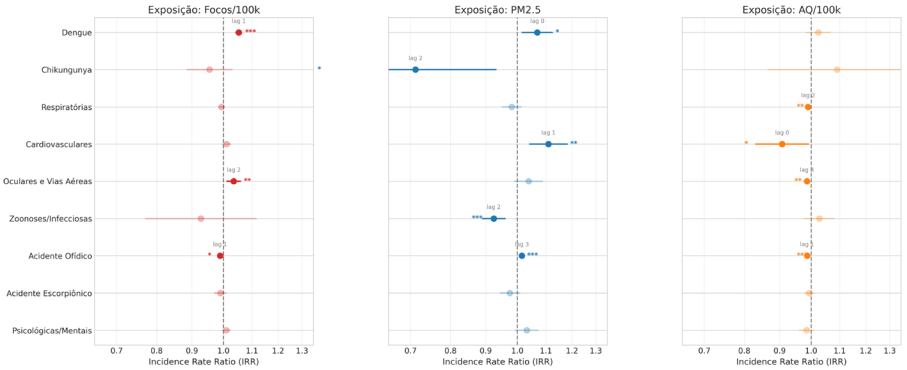
Outros dois achados acompanham a direção biologicamente esperada. As doenças oculares e das vias aéreas superiores associam-se aos focos de incêndio, com defasagem de dois meses, em magnitude também amplificada na Amazônia (+9,0%) frente à média nacional (+3,5%), compatível com a irritação direta por fumaça e material particulado. A dengue associa-se positivamente aos focos (+5,2% no Brasil; +8,7% na Amazônia, com defasagem de um mês), achado que deve ser lido com cautela, pois o mecanismo provável envolve alterações microclimáticas e a criação de criadouros temporários, e não a exposição à fumaça propriamente dita.



A honestidade da análise exige registrar, com igual ênfase, o que o modelo não confirma. As doenças respiratórias, o desfecho que a intuição associaria mais diretamente à fumaça, não apresentam associação positiva significativa com nenhum indicador de exposição, em nenhuma especificação. A leitura mais plausível não é a ausência de efeito biológico, amplamente documentado na literatura, mas uma limitação de mensuração: a contagem de focos e a agregação espacial não capturam adequadamente a exposição respiratória, e parte do agravo respiratório tende a se expressar em atendimento ambulatorial leve ou a ser subnotificada, em vez de gerar internação registrável. Convergem nessa direção tanto o painel quanto a sazonalidade, que mostra a respiratória seguindo o ciclo viral do inverno, não o do fogo. Registre-se ainda que o indicador de área queimada produz, para vários desfechos, coeficientes de sinal negativo, associação que provavelmente reflete redução de acesso aos serviços durante os episódios mais severos de fumaça, fenômeno coerente com a fragilidade de acesso documentada na seção 2.6, e que demanda investigação específica antes de qualquer interpretação causal.

Em síntese, o painel municipal sustenta um núcleo de achados robusto e regionalmente concentrado: o impacto agudo do fogo sobre a saúde manifesta-se de forma estatisticamente sólida pela via cardiovascular (associada ao PM2.5) e ocular (associada aos focos), com efeito amplificado na Amazônia Legal e ausente ou difuso no Resto do Brasil. Esse gradiente, maior dano exatamente onde as populações são mais vulneráveis e os serviços mais escassos, é a tradução empírica da injustiça distributiva que percorre este trabalho, e dialoga diretamente com a estimativa de custo desenvolvida nas seções 2.7 e 2.8. Cabe uma ressalva de leitura: a Tabela 4 inclui também associações negativas estatisticamente significativas, como a do PM2.5 com as causas infecciosas e zoonoses (IRR 0,924); esses sinais não são interpretados como efeito protetor da poluição, mas remetem às limitações já discutidas, a leitura bruta do PM2.5 na Amazônia e prováveis barreiras de acesso ao serviço nos períodos de maior fumaça, e por isso não sustentam inferência causal.

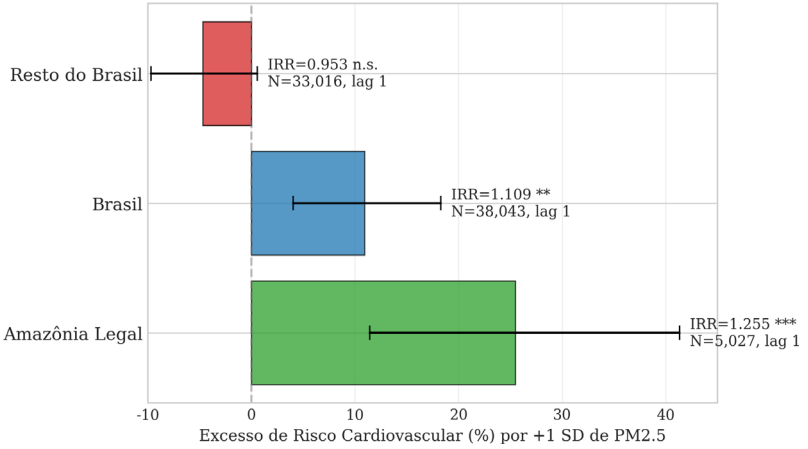
Figura 20 – Impacto da exposição ambiental na saúde, nível municipal: razões de taxas de incidência (IRR) por aumento de 1 desvio-padrão, por indicador de exposição (focos, PM2.5, área queimada)



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do CAMS (2024).

Nota: Pontos à direita de 1 indicam aumento de risco.

Figura 21 – Impacto do PM2.5 nas Doenças Cardiovasculares – Contraste Regional



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c) e CAMS (2024).

Nota: Destaque do achado central: associação entre PM2.5 e internações cardiovasculares, com efeito amplificado na Amazônia Legal (+25,5%) frente à média nacional (+10,9%).



Tabela 4 – Efeitos estatisticamente significativos do painel municipal (Brasil, Spec. completa com efeitos fixos e controles climáticos)

Desfecho	Indicador	IRR	IC 95%	p	Lag
Cardiovasculares	PM2.5	1,109	1,040–1,183	0,002	1
Oculares/vias aéreas	Focos	1,035	1,010–1,060	0,006	2
Dengue	Focos	1,052	1,040–1,065	<0,001	1
Dengue	PM2.5	1,069	1,015–1,125	0,012	0
Acidente ofídico	PM2.5	1,015	1,008–1,022	<0,001	3
Zoonoses/infecciosas	PM2.5	0,924	0,888–0,961	<0,001	2

Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do CAMS (2024).

Nota: IRR por aumento de 1 desvio-padrão na exposição.

Tabela 5 – Contraste regional do achado cardiovascular e ocular: Amazônia Legal versus Resto do Brasil (IRR por 1 desvio-padrão; n.s. = não significativo)

Desfecho / indicador	Amazônia Legal	Resto do Brasil	Leitura
Cardiovasculares / PM2.5	1,255 ($p < 0,001$)	n.s.	Efeito forte e exclusivo da Amazônia
Oculares / focos	1,090 ($p < 0,001$)	≈ 1,035	Amplificado na Amazônia
Respiratórias	n.s.	n.s.	Sem efeito detectável (ver texto)
Modelos significativos	10 de 27	3 de 27	Concentração regional do efeito

Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do CAMS (2024).

2.5 O SUS QUE NÃO CHEGA: INFRAESTRUTURA HOSPITALAR NAS REGIÕES MAIS EXPOSTAS

Os dados de impacto sanitário apresentados até aqui ganham outro peso quando confrontados com a realidade da infraestrutura de saúde disponível nos territórios mais afetados. O Capítulo 1



documentou que os 20 municípios com maior concentração de focos de incêndio estão todos na Amazônia Legal, e que em 2019 nenhum deles tinha leitos de UTI. Em 2024, após cinco anos e uma pandemia, 13 deles ainda não tinham. Esses não são apenas números de gestão hospitalar: são uma medida de até que ponto o Estado garante o direito à saúde nas regiões onde o risco sanitário é mais alto.

Para compreender o que significa viver em um município sem leitos de UTI em plena estação de queimadas, é preciso pensar em termos concretos. Uma pessoa que desenvolve síndrome coronariana aguda, um infarto, em setembro em um município como Novo Progresso ou São Félix do Xingu precisa ser transferida para outro município, percorrendo distâncias médias 50% superiores à média nacional, em condição de emergência, muitas vezes por estradas de terra ou por rio. O tempo perdido nesse deslocamento pode ser a diferença entre a sobrevivência e a morte. E esse deslocamento acontece precisamente nos meses em que a fumaça das queimadas eleva a incidência de infartos e internações cardiovasculares.

Tabela 6 – Indicadores de Infraestrutura Sanitária: Amazônia Legal versus Resto do Brasil

Indicador	Amazônia Legal	Resto do Brasil
Distância média ao serviço de diálise	+211% vs. média nacional	Referência
Distância média à UTI mais próxima	+50% vs. média nacional	Referência
UBS com geladeira em funcionamento	19%	32%
Leitos de UTI por 10 mil habitantes	2,14	3,12
Distância média ao hospital (km)	24,03 km	14,55 km
Municípios sem leitos hospitalares	40% da população	Menor percentual
Dificuldade de acesso à saúde (Quest.)	6,32/7 (C. Tradicionais)	–
Apoio governamental pós-incêndio (Quest.)	1,53/7 (C. Tradicionais)	–

Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a) e do questionário (Apêndice B).



A Tabela 6 sistematiza o que os dados do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES) revelam sobre essa desigualdade estrutural. A distância média ao serviço de diálise é 211% maior na Amazônia Legal do que a média nacional. Apenas 19% das Unidades Básicas de Saúde amazônicas têm geladeira em funcionamento, essencial para guardar vacinas e medicamentos termolábeis, contra 32% no restante do país. E 40% da população amazônica não tem nenhum leito hospitalar no próprio município.

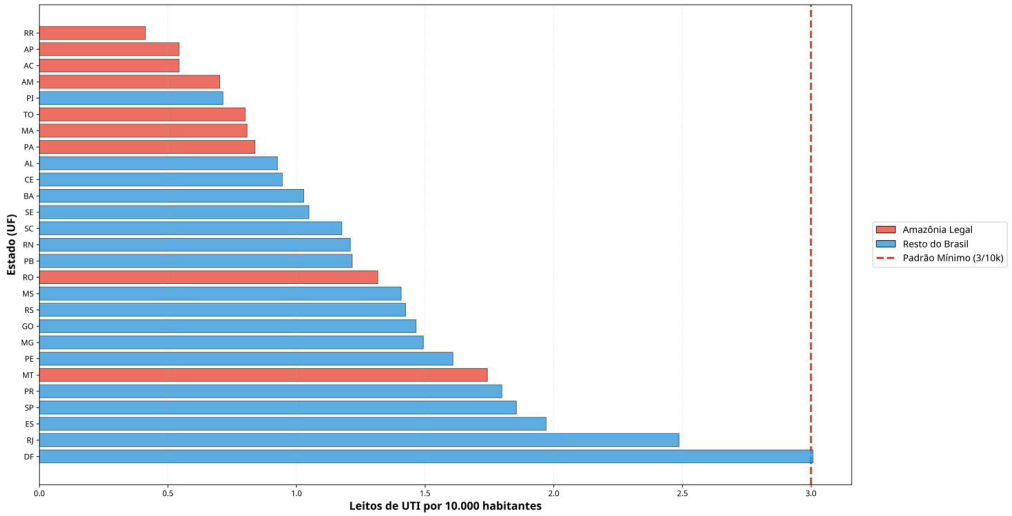
Esses números têm um contraponto subjetivo que os complementa: no questionário aplicado nesta pesquisa, as comunidades tradicionais e indígenas avaliaram a dificuldade de acesso à saúde durante as queimadas com média de 6,32 em uma escala de 0 a 7, em que 7 representa a maior dificuldade possível. E avaliaram o apoio governamental recebido após incêndios com média de 1,53 em 7, em que 0 representa a completa ausência de apoio. A coincidência entre a evidência objetiva do CNES e a percepção subjetiva das comunidades expostas é um dos resultados mais consistentes de toda a pesquisa: o que os dados administrativos registram como déficit estrutural é exatamente o que as pessoas que vivem nesse déficit experimentam como ausência do Estado.

Essa percepção encontra respaldo em estudos sobre o acesso à saúde em comunidades ribeirinhas amazônicas. Investigando dezessete comunidades localizadas nas hidrovias Tapajós e Arapiuns, Sousa e Cortes (2024) registraram tempos de deslocamento de até 18 horas entre as localidades e os hospitais de referência, além de identificarem que fatores como sazonalidade dos rios, direção do deslocamento e períodos de espera influenciam significativamente o tempo necessário para obtenção de atendimento. Em contextos de emergência, especialmente durante eventos extremos associados às queimadas e à degradação da qualidade do ar, essas barreiras geográficas e logísticas podem comprometer o acesso oportuno aos serviços de saúde. Trata-se, portanto, menos de uma falha operacional isolada do que da expressão de limitações

estruturais decorrentes da vasta extensão territorial amazônica e da insuficiência histórica de infraestrutura e recursos para atender populações dispersas.

A Figura 22 ordena os estados pela cobertura de leitos de UTI em 2019. Os estados amazônicos (em vermelho) concentram-se nas posições inferiores: Roraima (0,42 leitos por 10.000 habitantes), Amapá (0,55), Acre (0,55), Amazonas (0,73), à frente apenas de patamares próximos de zero. Apenas o Distrito Federal (3,02) atinge o padrão mínimo da OMS de três leitos por 10.000 habitantes.

Figura 22 – Leitos de UTI por 10.000 habitantes, por estado (2019)



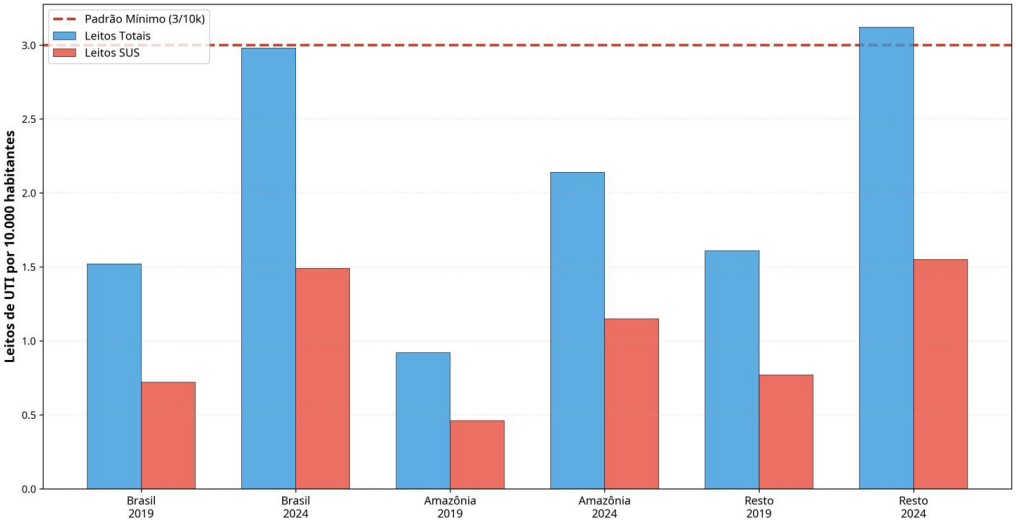
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a).

Nota: Estados amazônicos em vermelho ocupam as posições inferiores (RR 0,42; AP 0,55; AC 0,55; AM 0,73). DF (3,02) é o único a atingir o mínimo da OMS.

A evolução temporal entre 2019 e 2024 (Figura 23) revela expansão significativa impulsionada pela pandemia de COVID-19; os leitos SUS no Brasil cresceram 108,7%, de 15.227 para 31.781, mas a Amazônia Legal permanece muito abaixo do padrão mínimo

da OMS, passando de 0,46 para apenas 1,15 leito SUS por 10.000 habitantes. Mesmo o resto do Brasil (1,55 em 2024) está abaixo do mínimo recomendado.

Figura 23 – Leitos de UTI por 10.000 habitantes (totais vs SUS), 2019 vs 2024

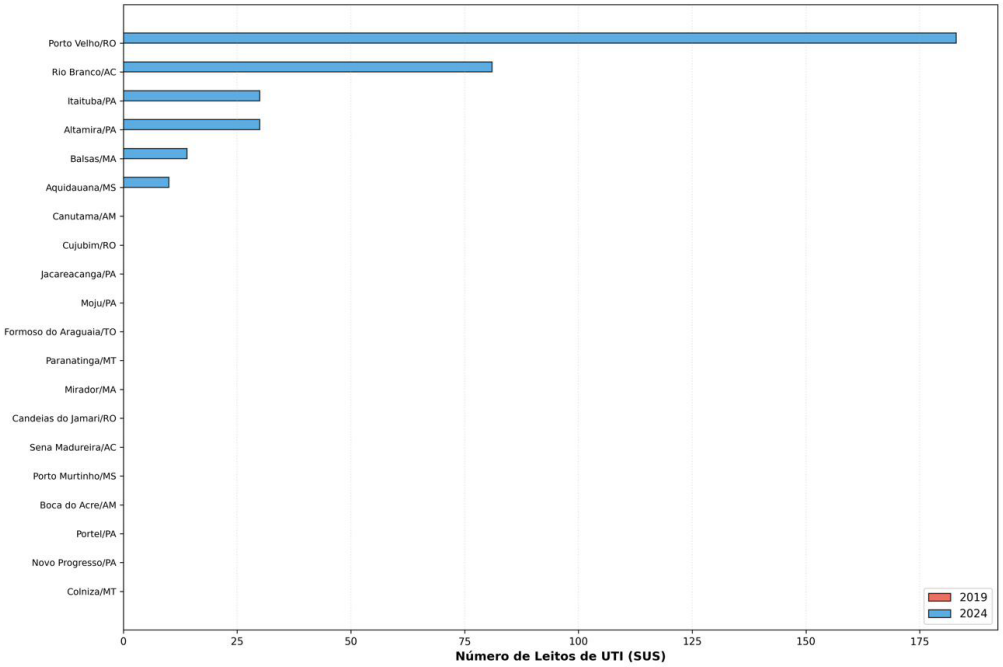


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a).

Nota: Brasil SUS: 0,72→1,49; Amazônia SUS: 0,46→1,15; Resto SUS: 0,77→1,55. Nenhuma região atinge o mínimo da OMS (3,0).

O paradoxo central desta seção é visualizado na Figura 24: nos vinte municípios com mais focos de incêndio do país, a evolução dos leitos de UTI entre 2019 e 2024 mostra que treze continuam com zero leitos cinco anos depois. Mesmo em municípios populosos como Moju/PA (90.795 habitantes), Portel/PA (66.898) e Boca do Acre/AM (38.246), a expansão impulsionada pela pandemia não chegou. Onde o fogo é mais intenso, o SUS não chegou.

Figura 24 – *Top* 20 municípios com mais focos: comparativo de leitos 2019 vs 2024

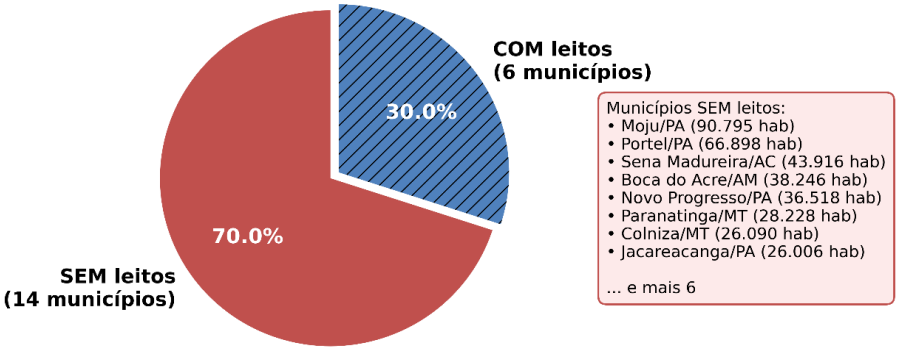


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a) e do INPE (2025a).

Nota: Em 2019, nenhum dos 20 municípios mais queimados tinha leitos de UTI; em 2024, treze continuam com zero. Porto Velho/RO concentra 182 leitos novos.

A síntese gráfica (Figura 25) confirma a dimensão da omissão estrutural: 70% dos vinte municípios mais queimados não possuem leitos de UTI em 2024, situação que afeta diretamente populações de até 90 mil habitantes residentes em territórios sob carga ambiental excepcional.

Figura 25 – *Top* 20 municípios com mais focos: distribuição por presença de leitos de UTI (2024)



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a) e do INPE (2025a).

Nota: 70% (14 municípios) permanecem sem qualquer leito de UTI em 2024; 30% (6 municípios) possuem algum leito.

À luz dos quatro critérios do direito à saúde apresentados no Capítulo 1 (seção 1.4), os dados desta seção documentam que, nas regiões da Amazônia com maior exposição a queimadas, nenhum deles está sendo plenamente satisfeito. Os serviços não estão disponíveis em quantidade suficiente (faltam leitos e UTIs). Não são acessíveis (as distâncias são proibitivas e os custos de transporte são altos para populações de baixa renda). E não têm a qualidade necessária para responder à sobrecarga sazonal que os incêndios produzem. Essa não é uma crítica ao trabalho dos profissionais de saúde que atuam nessas regiões, muitas vezes em condições extraordinariamente difíceis. É um diagnóstico sobre a insuficiência estrutural dos recursos que o Estado disponibiliza para garantir um direito que a Constituição Federal e o direito internacional reconhecem como fundamental.



2.6 A TRÍPLICE VULNERABILIDADE AMAZÔNICA

Os três eixos documentados até aqui, a exposição ambiental ao fogo, o padrão temporal de adoecimento e a insuficiência da infraestrutura de saúde, não são problemas separados que ocorrem por coincidência no mesmo território. São camadas que se sobrepõem e se reforçam mutuamente, produzindo uma condição de vulnerabilidade composta que esta pesquisa designa como tríplice vulnerabilidade amazônica. Essa condição atinge transversalmente a população amazônica exposta, caboclos, ribeirinhos, pequenos agricultores, populações urbanas das capitais sob fumaça, e também povos indígenas e comunidades tradicionais. Nas próximas páginas examina-se o caso das populações indígenas dentro do quadro mais amplo da tríplice vulnerabilidade, como subconjunto onde os três eixos se agravam de forma documentável.

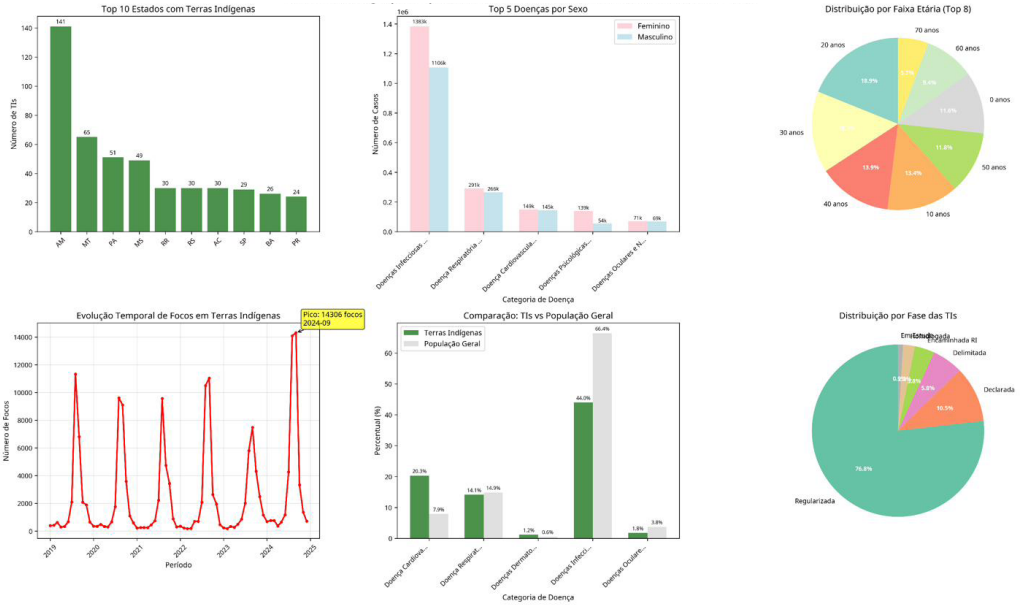
A primeira camada é a vulnerabilidade ambiental: os municípios amazônicos têm, em média, 67 vezes mais focos de incêndio por unidade de área do que o restante do país, e 81% deles excedem os limites da OMS para PM2.5 durante a estação de fogo. Isso significa que a exposição ao risco sanitário é estruturalmente maior na Amazônia do que em qualquer outra região do Brasil. A segunda camada é a vulnerabilidade sanitária: com 40% da população sem leitos hospitalares no próprio município, distâncias médias ao hospital 65% superiores à média nacional e cobertura de UTI abaixo do mínimo recomendado, a capacidade de resposta do sistema de saúde é estruturalmente menor precisamente onde o risco é maior. A terceira camada é a vulnerabilidade social: os municípios mais



afetados concentram maior pobreza, menor IDH e populações tradicionais com menor representação política, menor acesso a redes de proteção social e maior dependência direta de recursos naturais que as queimadas destroem.

A combinação dessas três camadas produz um resultado que os dados indicam: as mesmas queimadas produzem consequências sanitárias desproporcionalmente mais graves na Amazônia do que produziriam em uma região com infraestrutura equivalente à média nacional. Não porque as pessoas amazônicas sejam biologicamente mais vulneráveis, mas porque as condições em que vivem amplificam sistematicamente os efeitos do fogo. Aragão (2008) articula esse fenômeno com precisão no contexto do direito ambiental europeu: a vulnerabilidade é uma forma de fragilidade social, econômica, cultural e geográfica que expõe mais gravemente aos riscos certos indivíduos e certas comunidades, e há uma infeliz coincidência entre a ocorrência geográfica dos riscos e a ocupação do solo por populações vulneráveis. Na Amazônia, essa infeliz coincidência não é um acidente histórico: é o resultado de décadas de políticas que expandiram a fronteira agropecuária em direção a territórios habitados pelas populações mais pobres e menos protegidas do país. Os territórios indígenas concentram a expressão mais aguda dessa vulnerabilidade, como detalha a Figura 26.

Figura 26 – Análise de subgrupos populacionais vulneráveis: queimadas e saúde (2019–2024) — seis painéis (a–f)



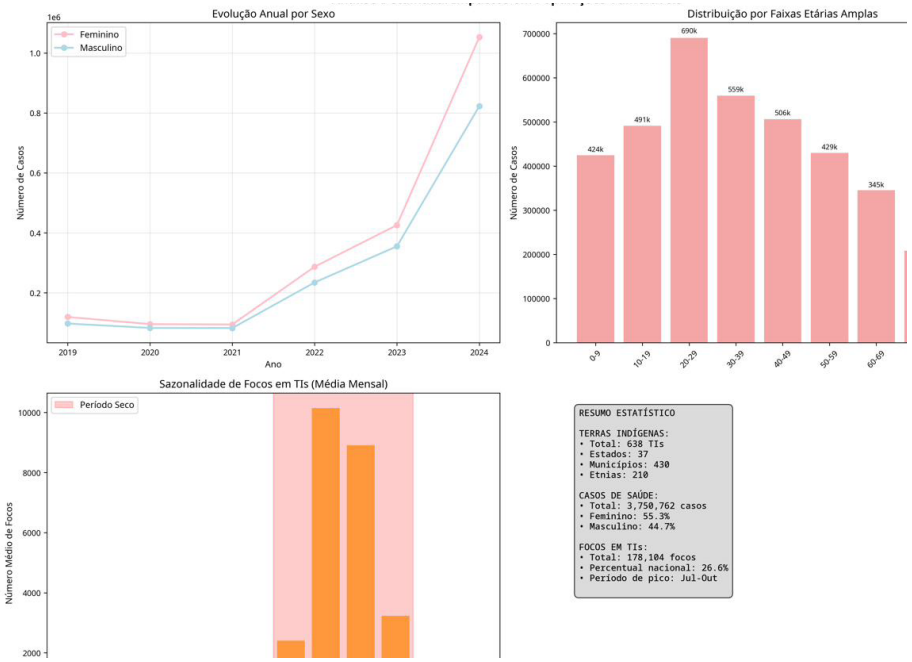
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), FUNAI (2024) e INPE (2025a).

Nota: (a) Top 10 estados com TIs (AM 141, MT 65, PA 51); (b) desfechos por sexo; (c) faixas etárias; (d) evolução de focos em TIs (pico 14.306 em set/2024); (e) cardiovasculares em municípios com TI vs população geral (20,3% vs 7,9%); (f) situação fundiária (76,8% regularizadas).

A desagregação temporal e demográfica desses impactos (Figura 27) revela o crescimento exponencial de casos a partir de 2022, de patamares de 100 mil para mais de um milhão em 2024, e a sazonalidade marcada dos focos em Terras Indígenas, com pico em agosto (10.165 focos médios mensais). O resumo estatístico contabiliza 638 TIs, 210 etnias, e 178.104 focos em municípios com TIs (26,6% dos focos da Amazônia Legal).



Figura 27 – Análise detalhada: impactos em populações vulneráveis — três painéis



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e da FUNAI (2024).

Nota: Evolução anual por sexo (1,05M feminino e 825 mil masculino em 2024); faixas etárias (pico 20–29 anos, 690 mil); sazonalidade dos focos em TIs (pico ago–set).

2.6.1 O AGRAVAMENTO INDÍGENA: EVIDÊNCIA EMPÍRICA DA TRÍPLICE VULNERABILIDADE NO EXTREMO

Dentro do quadro da tríplice vulnerabilidade amazônica, as populações indígenas constituem o subconjunto onde os três eixos atingem o seu grau mais agudo. A análise empírica que se apresenta a seguir, baseada no cruzamento entre os dados do SIH-SUS já discutidos e os dados do Sistema de Informação da Atenção à



Saúde Indígena (SIASI/SESAI/MS) para o período 2020–2025, documenta esse agravamento em três planos articulados: o perfil diagnóstico diferenciado, a linha de base sanitária (*baseline*) estruturalmente inferior e o colapso operacional nas Terras Indígenas mais afetadas pelo fogo.

Quanto ao perfil diagnóstico: nos municípios com Terras Indígenas, as doenças cardiovasculares representam 20,3% dos casos de saúde registrados no período; na população geral nacional, o mesmo grupo corresponde a apenas 7,9%. Essa proporção superior a duas vezes sugere fortemente a hipótese de que a exposição prolongada e recorrente ao fogo, associada a menor cobertura hospitalar e maior isolamento geográfico, amplifica a vulnerabilidade cardiovascular de forma que as médias nacionais não conseguem capturar. O dado, isoladamente, sustenta a tese de que a tríplice vulnerabilidade opera com particular intensidade nesses territórios.

Quanto à linha de base sanitária: a Tabela 7 apresenta a comparação direta entre a oferta de cuidados disponível à população indígena assistida pela SESAI e a oferta disponível à população geral brasileira atendida pelo SUS. A densidade médica no SasiSUS em 2025 é de aproximadamente 0,9 médicos por mil indígenas assistidos (716 médicos para cerca de 800 mil indígenas cadastrados), face à média nacional brasileira de aproximadamente 2,5 por mil e à recomendação da Organização Mundial da Saúde de 3,0 por mil. A média de atendimentos médicos efetivamente prestados é de cerca de 1 por indígena por ano na Amazônia, face a 2,5 a 3,0 atendimentos médicos por habitante por ano no SUS geral. A população indígena assistida recebe, portanto, menos de metade do volume de atendimento médico *per capita* disponível à população não indígena, partindo de um patamar já estruturalmente inferior. O modelo SasiSUS compensa parcialmente essa lacuna com forte presença de Agentes Indígenas de Saúde e técnicos de enfermagem, o que eleva o número total de atendimentos *per capita*, mas não substitui a presença médica especializada.



Tabela 7 – Comparação da oferta de cuidados de saúde: população indígena (SasiSUS) vs população geral (SUS), Brasil, 2025

Indicador (2025)	Indígenas (SasiSUS)	População geral (SUS)	Padrão OMS
Densidade médica (médicos por 1.000 hab.)	0,90	≈ 2,5	3,0
Atendimentos médicos por habitante/ano	≈ 1,0	2,5 a 3,0	-
Razão Técnico de Enf.: Médico (atendimentos)	8,9:1	≈ 3:1	-
Atendimentos totais por habitante/ano (todas as categorias)	≈ 22,9	3 a 4 (UBS)	-

Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024a, 2024b, 2024c e 2025).

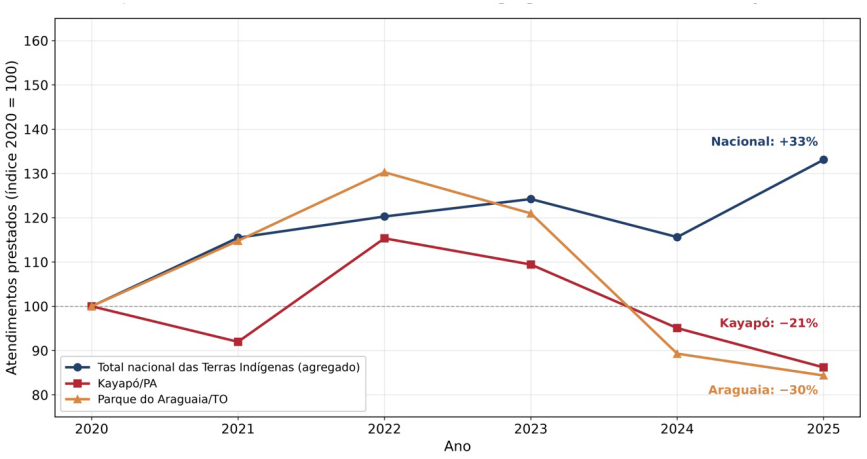
Nota: População indígena assistida pelo SasiSUS estimada em ~800.000 (no Brasil) e ~500.000 (na Amazônia Legal).

Quanto ao colapso operacional nas TIs queimadas: a análise da série histórica 2020–2025 revela um padrão particularmente interessante. O volume agregado de atendimentos prestados pela SESAI no conjunto das Terras Indígenas do país cresceu cerca de 33% entre 2020 e 2025 (de 13,6 milhões para 18,1 milhões de atendimentos; Figura 28), refletindo esforço institucional concreto de reconstrução da saúde indígena, com destaque para a resposta à emergência sanitária no DSEI Yanomami (cujos atendimentos cresceram de forma acentuada no período). Os atendimentos médicos especificamente cresceram cerca de 30% entre 2020 e 2024. Apesar desse esforço agregado, os atendimentos nas duas Terras Indígenas mais atingidas pelos focos de incêndio identificadas no Capítulo 1, Kayapó/PA e Parque do Araguaia/TO, caíram significativamente no mesmo período: −21% e −30%, respectivamente, comparando 2025 com 2023 (Figura 28). A divergência entre a trajetória agregada amazônica e a trajetória das TIs mais queimadas indica que o fogo, para além dos efeitos sanitários diretos sobre quem o respira, compromete a capacidade operacional do sistema de saúde indígena em alcançar precisamente as populações mais vulneráveis.

Os dados por Terra Indígena permitem testar diretamente se o sistema de saúde responde ao fogo, e o resultado expõe a fragilidade do acesso. Nos anos de maior queimada os atendimentos não

aumentam; nas Terras Indígenas mais atingidas, caem. Nessas Terras Indígenas, o ano de pico de focos (2024) coincide com o menor volume de atendimentos do período (Figura 29), padrão que persiste em termos per capita, controlando pela população do Censo 2022. No conjunto das Terras Indígenas, a relação dentro de cada território é praticamente nula no mesmo ano ($r = -0{,}01$) e negativa com um ano de defasagem ($r = -0{,}15$): mais fogo é seguido de menos atendimento, à exceção de territórios sob resposta emergencial específica, como o Yanomami. Um sistema sensível à necessidade ampliaria a oferta quando a exposição à fumaça cresce; observa-se o contrário, a perda de alcance justamente quando o risco é maior. O fogo atinge, assim, a saúde indígena por duas vias: adoece quem respira a fumaça e afasta o cuidado de quem mais precisa, no momento em que mais precisa.

Figura 28 – Evolução dos atendimentos prestados pela SESAI no período 2020–2025, em índice (2020 = 100)

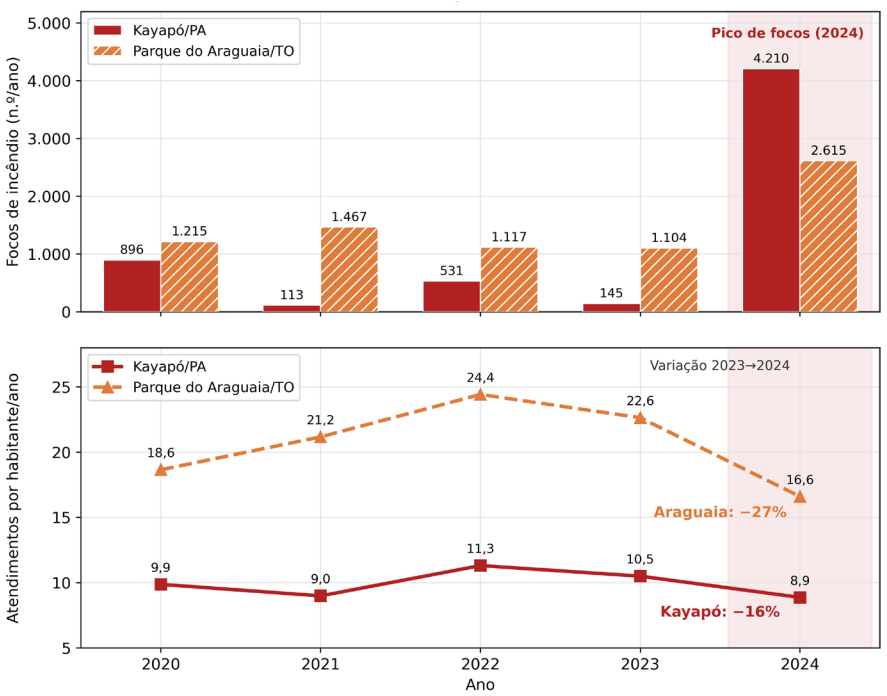


Fonte: elaboração própria, a partir de dados do SIASI/SESAI (Ministério da Saúde, 2025).

Nota: A linha azul representa o total agregado nacional das Terras Indígenas; as linhas coloridas representam as Terras Indígenas com maior incidência de focos de incêndio identificadas neste livro. Enquanto o agregado nacional cresce, as TIs mais queimadas perdem oferta.



Figura 29 – Focos de incêndio e atendimentos por habitante nas duas Terras Indígenas mais queimadas (2020–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do INPE (2025a), do SIASI/SESAI (Ministério da Saúde, 2025) e do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022).

Nota: Painel superior: focos de incêndio anuais (satélite de referência AQUA, tarde). Painel inferior: atendimentos prestados pela SESAI por habitante, com base na população do Censo 2022 (Kayapó/PA: 6.365; Parque do Araguaia/TO: 4.503). No ano de pico de focos (2024), os atendimentos por habitante caem ao menor valor da série nas duas TIs: –16% em Kayapó e –27% em Parque do Araguaia, em relação a 2023.

A leitura jurídica que se impõe articula três pontos. Primeiro, a vontade política de proteger populações indígenas, ainda quando presente e materializada em recursos (como demonstram os investimentos pós-2023), encontra limites operacionais concretos quando o fogo intenso compromete o acesso aos territórios. Segundo, a base SIASI não discrimina por motivo da consulta, impedindo inferência



direta sobre causas específicas da queda; as hipóteses plausíveis incluem inacessibilidade logística durante crises de fumaça, deslocamento temporário de populações, redução de operações da própria SESAI em zonas de risco, e subnotificação por desorganização administrativa em períodos de emergência, qualquer das quais sustenta o argumento de fragilidade estrutural da resposta. Terceiro, a proteção do direito à saúde das populações indígenas mais expostas exige enfrentar o fogo na origem, e não apenas reforçar a resposta sanitária *post hoc*, agenda em que os instrumentos transnacionais examinados no Capítulo 3, designadamente o Regulamento Europeu sobre Produtos Livres de Desmatamento, adquirem relevância acrescida precisamente por operarem com independência da conjuntura política doméstica brasileira.

Os três eixos da vulnerabilidade amazônica, comparados com a média nacional, evidenciam a sobreposição que define a situação da região. As três dimensões são apresentadas separadamente, sem composição em um único escore, como indicadores objetivos de cada eixo, mas a sua convergência geográfica sobre o mesmo território é o argumento central desta seção. Municípios com alta exposição ao fogo, baixa cobertura hospitalar e alto isolamento social concentram os três fatores simultaneamente, o que amplifica os impactos de forma que nenhum dos eixos, tomado isoladamente, seria capaz de expressar. O agravamento documentado nas populações indígenas, examinado anteriormente, constitui o caso-limite empírico dessa tríplice convergência.

No plano jurídico, a tríplice vulnerabilidade tem um enquadramento preciso no direito internacional dos direitos humanos. A Corte Interamericana de Direitos Humanos, na Opinião Consultiva OC-23/17 de 2017, é explícita: os Estados têm obrigações reforçadas de proteção quando os efeitos de danos ambientais recaem desproporcionalmente sobre populações que já enfrentam outras formas de exclusão. Moreira e Gomes (2013) sublinham que o direito à saúde, para ser universal, precisa ser garantido sem discriminação, e que



manter uma estrutura de infraestrutura sanitária que concentra a ausência de serviços nas regiões de maior risco ambiental constitui uma forma de discriminação indireta que o direito internacional proíbe. Não é preciso que haja intenção discriminatória: basta que o efeito seja discriminatório, e os dados aqui apresentados, em particular a quantificação do agravamento indígena, mostram que é.

2.7 ESTIMATIVA DA CARGA SANITÁRIA: CASOS ATRIBUÍVEIS ÀS QUEIMADAS

As seções anteriores estabeleceram dois resultados centrais: a sazonalidade dos agravos (seção 2.4.1) e, sobretudo, um conjunto de associações robustas entre a exposição ao fogo e desfechos de saúde, identificadas pelo painel municipal de efeitos fixos (seção 2.4.2), com destaque para o efeito do PM2.5 sobre as internações cardiovasculares, amplificado na Amazônia Legal. Resta a pergunta de magnitude: a quantos casos, e a que custo, esse impacto corresponde no agregado nacional? Antes de respondê-la, é preciso delimitar o que o painel pode e o que não pode oferecer. Concebido para testar a atribuição (isto é, para isolar se existe efeito do fogo acima da sazonalidade), o modelo de painel não é, por si, o instrumento adequado para produzir uma contagem nacional de casos atribuíveis, tarefa que exigiria um desenho epidemiológico específico de estimação de carga sanitária populacional.

Por essa razão, a estimativa de casos e de custo apresentada nesta e na próxima seção não pretende ser uma contagem epidemiológica definitiva, mas um exercício contrafactual exploratório, construído sobre o próprio painel municipal, em três passos. Primeiro, delimita-se o universo financeiro: os R$ 30,89 bilhões em gastos do SIH-SUS com internações cardiorrespiratórias



(circulatórias e respiratórias) no Brasil entre 2019 e 2024 (valor total pago por local de internação), que incluem todas as internações dessas categorias, qualquer que seja a causa. Segundo, estima-se a fração desse universo atribuível ao fogo: para cada município, mês e categoria diagnóstica, comparam-se as internações observadas com as esperadas em um cenário de menor exposição, o percentil 25 da exposição observada, com efeitos fixos de mês, de ano e de unidade federativa (que absorvem sazonalidade, tendência temporal e características permanentes de cada estado) e a população da UF como termo de deslocamento logarítmico (*offset*); a diferença entre observado e esperado fornece os casos atribuíveis, limitados, como salvaguarda conservadora contra sobreestimação, a no máximo 10% dos observados em cada categoria. Terceiro, convertida ao universo de R$ 30,89 bilhões, essa fração resulta em um custo atribuível da ordem de R$ 1,53 bilhão, cerca de 5% do total.

A literatura epidemiológica de referência entra aqui não como fonte do cálculo, mas como aferição de plausibilidade. Requia *et al.* (2021) e Ye *et al.* (2022), publicados na Nature Communications e desenhados para estimar a morbidade e a mortalidade atribuíveis à fumaça de queimadas no Brasil, reportam percentuais que não foram convertidos diretamente em custo, porque se referem a populações expostas, e não ao total nacional. O seu papel é outro: o efeito que o painel estimou para as internações cardiovasculares na Amazônia, um aumento de 25,5% por desvio-padrão de PM2.5, é de magnitude praticamente idêntica ao incremento de 27% relatado por Requia *et al.* (2021) para a Região Norte, e essa convergência entre uma estimativa independente, produzida com dados municipais brasileiros, e a literatura internacional de referência confere confiança à ordem de grandeza obtida. O que se segue, portanto, é uma estimativa exploratória de ordem de grandeza, e não um cálculo pericial definitivo.

A distinção entre custo total de uma categoria diagnóstica e custo atribuível a um fator de risco específico é central para a leitura dos números desta seção. O custo total, os R$ 30,89 bilhões



em internações cardiorrespiratórias registrados pelo SIH-SUS, é o universo financeiro dentro do qual as queimadas operam. O custo atribuível é a fração desse universo que pode ser razoavelmente associada à exposição ao fogo. A estimativa dessa fração, apresentada na seção 2.8, deve ser entendida como ordem de grandeza exploratória, e não como cálculo exato: serve para dimensionar o problema e para fundamentar a discussão sobre responsabilização patrimonial prevista pelo princípio do poluidor-pagador, não para fixar um valor de indenização.

2.8 A DIMENSÃO FINANCEIRA: GASTOS HOSPITALARES DO SUS E CUSTO ATRIBUÍVEL ESTIMADO

Quantificar o impacto financeiro das queimadas sobre o sistema público de saúde é uma tarefa metodologicamente delicada. O fogo não assina uma fatura hospitalar: a sua contribuição para o custo das internações é mediada por múltiplos fatores e, para ser estimada com rigor, requer métodos causais que esta pesquisa ainda não dispõe de dados suficientes para aplicar em escala nacional. A abordagem adotada é deliberadamente mais conservadora: apresenta os gastos totais observados do SUS nas categorias diagnósticas para as quais a literatura epidemiológica estabelece associação com exposição a fumaça de queimadas, e estima, por um exercício contrafactual construído sobre o painel municipal, a fração desses gastos associável ao fogo, aferindo a sua plausibilidade pela literatura epidemiológica.

O Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH-SUS), acessado via internet, registra os valores totais pagos pelo sistema público em internações hospitalares por categoria diagnóstica, por



local de internação, no período 2019–2024. A Tabela 8 apresenta esses valores para as duas categorias com maior expressão financeira e maior relevância para os impactos das queimadas: doenças do aparelho circulatório (CID-10 I00-I99) e doenças do aparelho respiratório (CID-10 J00-J99). Nota-se crescimento consistente ao longo do período, com aceleração marcada a partir de 2022, refletindo tanto o aumento dos eventos climáticos extremos quanto a recuperação do sistema de saúde após a pandemia.

Tabela 8 – Gastos Hospitalares do SUS em Categorias Cardiorrespiratórias Compatíveis com Impactos Sanitários Associados à Poluição Atmosférica e Queimadas (2019–2024)

Ano	Doenças circulatórias (I00-I99)	Doenças respiratórias (J00-J99)	Total anual
2019	R$ 3.097.343.158	R$ 1.310.663.568	R$ 4.408.006.726
2020	R$ 2.791.812.783	R$ 1.077.804.577	R$ 3.869.617.360
2021	R$ 2.903.489.390	R$ 1.194.789.982	R$ 4.098.279.372
2022	R$ 3.628.726.022	R$ 1.723.387.386	R$ 5.352.113.408
2023	R$ 4.218.827.669	R$ 1.851.997.796	R$ 6.070.825.465
2024	R$ 5.098.589.584	R$ 1.996.713.058	R$ 7.095.302.642
Total	R$ 21.738.788.606	R$ 9.155.356.367	R$ 30.894.144.973

Fonte: elaboração própria a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: Os valores incluem todas as internações nas categorias diagnósticas indicadas, independentemente da causa etiológica, e não devem ser interpretados como custo exclusivamente atribuível às queimadas.

O valor acumulado de R$ 30,89 bilhões em seis anos representa o universo financeiro dentro do qual os custos atribuíveis às queimadas se inscrevem. A parcela associada ao fogo foi estimada pelo exercício contrafactual descrito na seção 2.7; a literatura epidemiológica disponível serve-lhe de aferição de plausibilidade. Requia *et al.* (2021) estimaram que a exposição ao PM2.5 de queimadas está associada a aumentos de 23% nas internações respiratórias e 21% nas internações cardiovasculares nas populações expostas;



na Região Norte, os aumentos estimados foram de 38% e 27%, respectivamente. Ye *et al.* (2022), por seu turno, identificaram aumento de 3,1% na mortalidade geral, 2,6% cardiovascular e 7,7% respiratória por cada incremento de 10 μg/m³ de PM2.5 de incêndios no Brasil.

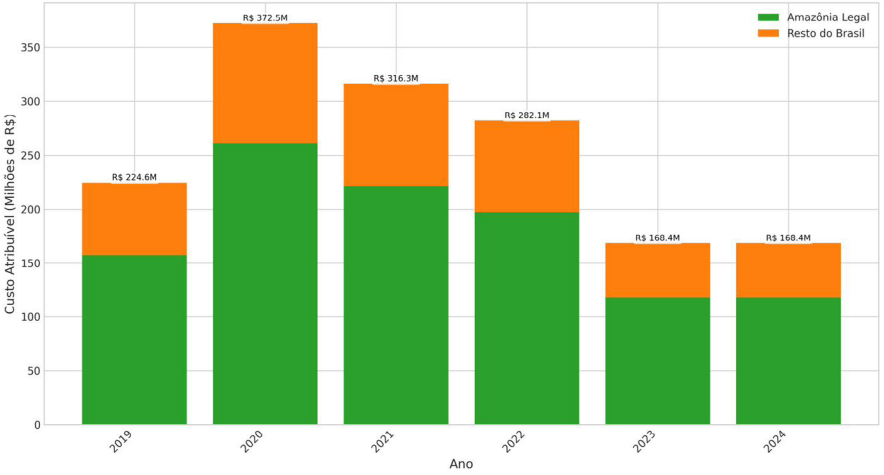
Esses percentuais não devem ser automaticamente convertidos em custo econômico por duas razões metodológicas: foram estimados para populações expostas, não para o total nacional; e referem-se a internações e mortalidade, não diretamente ao custo financeiro unitário. O uso adequado desses resultados é de plausibilidade epidemiológica: eles sugerem que uma fração não trivial dos R$ 30,89 bilhões tem relação com a exposição ao fogo amazônico. A fração propriamente dita, contudo, não foi obtida desses percentuais, mas do exercício contrafactual sobre o painel municipal descrito na seção 2.7, que a situa na ordem de R$ 1,5 bilhão no período, cerca de 5% do universo, conforme se detalha a seguir; à literatura cabe conferir-lhe a plausibilidade externa.

Sob a perspectiva dos direitos humanos, a dimensão financeira importa por uma razão que vai além da quantificação: documenta que os custos das queimadas ilegais estão sendo internalizados pelo erário público e, no fim das contas, pela população como contribuinte, e não pelos agentes econômicos que se beneficiam das atividades que as produzem. Isso é exatamente o que o princípio do poluidor-pagador busca corrigir. A trajetória crescente dos gastos a partir de 2022 e os valores de 2023 (R$ 6,07 bilhões) e 2024 (R$ 7,10 bilhões) são compatíveis com a hipótese de que as queimadas contribuem para a pressão financeira sobre o SUS, embora essa compatibilidade não constitua indício de causalidade.

A estimativa do custo atribuível aos incêndios, desagregada por ano e região (Figura 30), situa-se na ordem de R$ 1,5 bilhão no período 2019–2024 (estimativa central em torno de R$ 1,53 bilhão), aproximadamente 5% dos R$ 30,89 bilhões em gastos cardiorrespiratórios totais. Essa proporção é compatível com a magnitude dos

efeitos relatados na literatura para populações expostas (Requia *et al.*, 2021) e deve ser lida como ordem de grandeza, e não como valor exato: resulta de uma modelagem com limitações conhecidas, que serão explicitadas adiante. A Amazônia Legal concentra entre 65% e 74% desse custo atribuível anual, com pico em 2020 (R$ 372,5 milhões) e valores menores em 2023–2024 (R$ 168,4 milhões cada).

Figura 30 – Estimativa exploratória de custo de saúde atribuível por ano e região



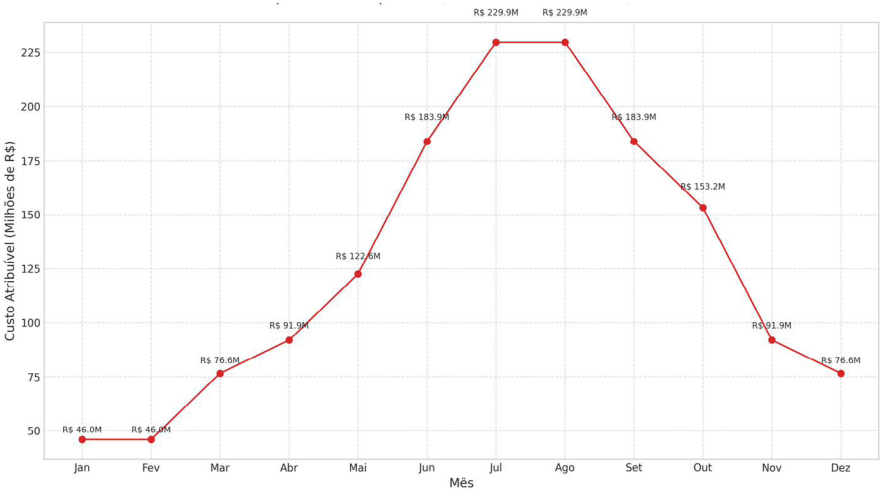
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do CAMS (2024).

Nota: Amazônia Legal concentra 65–74%.

A distribuição mensal da estimativa (Figura 31) concentra-se nos meses do período seco: julho e agosto correspondem, em média, a cerca de R$ 229,9 milhões cada, aproximadamente cinco vezes a média de janeiro e fevereiro (R$ 46,0 milhões). Essa sazonalidade acompanha a dos focos e sugere uma implicação operacional: o pré-posicionamento de recursos sanitários nos meses anteriores ao pico poderia, em princípio, reduzir parte dos custos hospitalares.



Figura 31 – Custo atribuível por incêndios por mês (média anual 2019–2024)



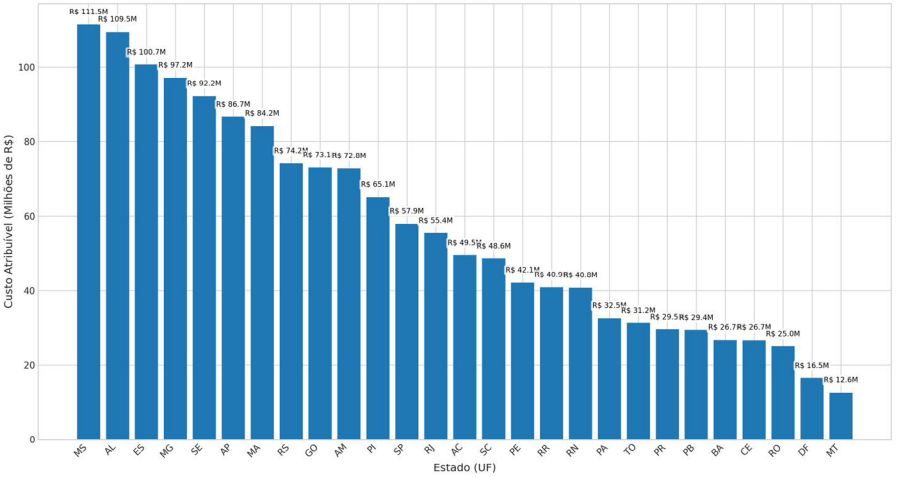
Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c), do INPE (2025a) e do CAMS (2024).

Nota: Estimativa exploratória. Maior em jul–ago (R$ 229,9M cada), menor em jan–fev (R$ 46,0M).

A distribuição por estado (Figura 32) deve ser lida com cautela e, na verdade, ilustra os limites da atribuição em nível estadual. Os estados com maior custo estimado não são os de maior incidência de focos: Mato Grosso do Sul (R$ 111,5M), Alagoas (R$ 109,5M), Espírito Santo (R$ 100,7M) e Minas Gerais (R$ 97,2M) aparecem à frente de estados amazônicos com muito mais fogo. Esse descompasso sugere que a atribuição estadual capta, em parte, o volume geral de gasto hospitalar de cada estado, e não a pressão de queimadas, razão adicional para tratar a cifra apenas como ordem de grandeza nacional. Uma leitura complementar é a de custos transferidos (atendimentos de residentes amazônicos realizados em estados de referência regional), mas trata-se de hipótese não demonstrada. Em nenhuma hipótese a Figura 32 deve ser tomada como *ranking* de responsabilidade estadual; apenas a magnitude nacional agregada é interpretável com segurança.



Figura 32 – Estimativa de custo atribuível por UF



Fonte: elaboração própria, a partir de dados do Ministério da Saúde (2024c).

Nota: MS (111,5), AL (109,5), ES (100,7), MG (97,2) à frente; estados amazônicos (AP, MA, AM, RR, PA, TO, RO e MT), com mais focos, em posições inferiores. Estimativa exploratória.

Nota sobre as limitações da estimativa de custo. A cifra, da ordem de R$ 1,5 bilhão, e as suas desagregações resultam de uma modelagem observacional com limitações que importa reconhecer. Primeiro, baseia-se em associações estatísticas entre exposição ao fogo e gastos hospitalares, não em apuração individualizada de causa por internação; não estabelece, portanto, nexo causal caso a caso. Segundo, depende de *proxies* de exposição (focos, área queimada, PM2.5) cuja precisão varia regionalmente, como discutido na seção 2.3. Terceiro, a COVID-19 pode confundir os valores de 2020–2021: ainda que se tenha procurado excluir as internações por síndrome respiratória aguda grave (SRAG), parte do excesso hospitalar do período pode refletir a pandemia, e não o fogo. Quarto, a conversão da fração modelada em custo, dentro do universo do SIH-SUS, e o seu cotejo com os coeficientes da literatura carregam incerteza não desprezável. Pelo conjunto dessas razões, o valor deve ser tratado



como ordem de grandeza plausível, coerente com os 5% de um universo de R$ 30,89 bilhões, e como ponto de partida para estimativas futuras mais refinadas, e não como cálculo pericial definitivo. É precisamente para superar esses limites que a formulação mais completa apresentada no IAFS 2026 (Perazzoni *et al.*, 2026) foi concebida: além de buscar maior robustez causal, propõe-se a antecipar valores com semanas ou meses de antecedência, a partir dos dados de focos e de área queimada, em apoio às políticas públicas, agenda do protótipo *Tatatinga* e objeto de desenvolvimento futuro. Essa cautela não invalida o argumento central: mesmo a uma fração modesta do custo total corresponde um valor expressivo, hoje suportado integralmente pelo erário e não pelos agentes que se beneficiam das atividades que produzem o fogo.

2.9 DIAGNÓSTICO DE PERCEPÇÕES INSTITUCIONAIS: O *SURVEY* EXPLORATÓRIO

Para complementar e qualificar a interpretação dos achados quantitativos, incorporou-se um survey exploratório com stakeholders diretamente envolvidos na temática. O instrumento não possui pretensão de representatividade estatística populacional, mas funciona como ferramenta relevante de qualificação institucional do diagnóstico, revelando convergências perceptivas importantes quanto à fragmentação institucional, percepção de impunidade, limitações operacionais e desconexão entre diferentes setores envolvidos. O instrumento completo e os resultados detalhados do questionário constam do Apêndice B.



Aplicado a 124 respondentes em quatro perfis, profissionais de saúde (A), bombeiros e agentes de defesa civil (B), agentes de fiscalização e do sistema de justiça (C) e membros de comunidades tradicionais e indígenas (D), o instrumento foi construído a partir do referencial teórico e de categorias temáticas derivadas da literatura. Por seu caráter qualitativo e exploratório, não se pretende representatividade estatística nem se constroem escores psicométricos: a credibilidade dos achados apoia-se na convergência entre perfis com posições estruturalmente distintas, uma forma de triangulação, detalhada no Apêndice B. Os resultados completos por perfil e questão constam desse apêndice. Dois padrões estruturais emergem da análise cruzada com relevância direta para a arquitetura das respostas discutidas no Capítulo 3.

O primeiro é uma assimetria sistemática na percepção dos impactos sanitários: profissionais de saúde (61%) e comunidades tradicionais (60%) reconhecem claramente os efeitos graves das queimadas sobre a saúde; brigadistas (24%) e agentes de fiscalização (17%) tendem a subestimá-los. Isso significa que os atores com maior capacidade operacional de pré-posicionar respostas sanitárias não percebem a magnitude do problema que deveriam antecipar.

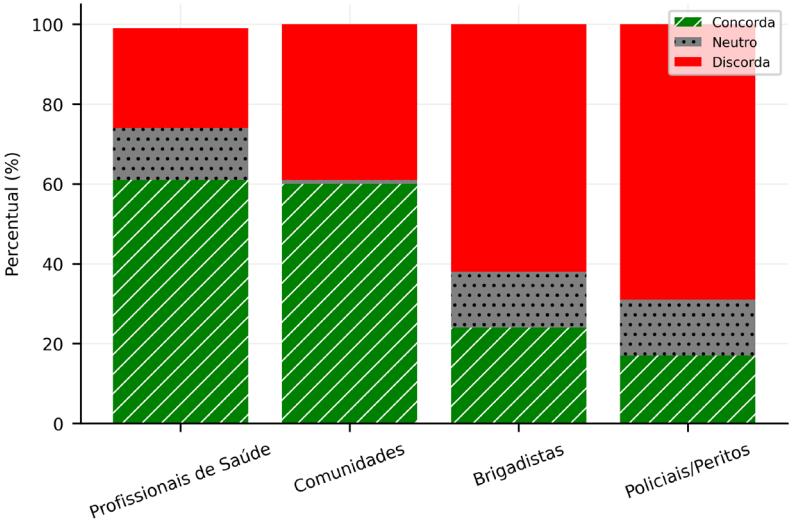
O segundo é um viés de autoavaliação que só se torna visível quando os grupos são questionados de forma cruzada. Cada grupo avalia positivamente o próprio desempenho e criticamente os demais, o que se denomina aqui cegueira institucional recíproca. Nenhum ator, a partir de dentro da sua própria instituição, consegue ver o sistema como um todo. É precisamente nesses vazios entre as partes que as populações mais vulneráveis ficam desprotegidas.

A distribuição das respostas por tema e perfil (Figuras 33 a 36) torna visíveis os padrões descritos. Como já dito, quanto aos impactos das queimadas na saúde (Figura 33), profissionais de saúde (61%) e comunidades (60%) reconhecem-nos claramente,



ao passo que brigadistas (24%) e agentes de fiscalização (17%) tendem a subestimá-los. Quanto às causas (Figura 34), há forte convergência na atribuição à origem humana e ilegal, sobretudo entre comunidades (83%) e profissionais de saúde (64%). Na avaliação das políticas públicas (Figura 35), predomina a discordância quanto à eficácia, com as comunidades quase unânimes, apenas cerca de 7% as consideram suficientes. Quanto à responsabilização e à impunidade (Figura 36), a percepção de impunidade é praticamente transversal a todos os perfis. A síntese dos resultados por perfil consta do Apêndice B.

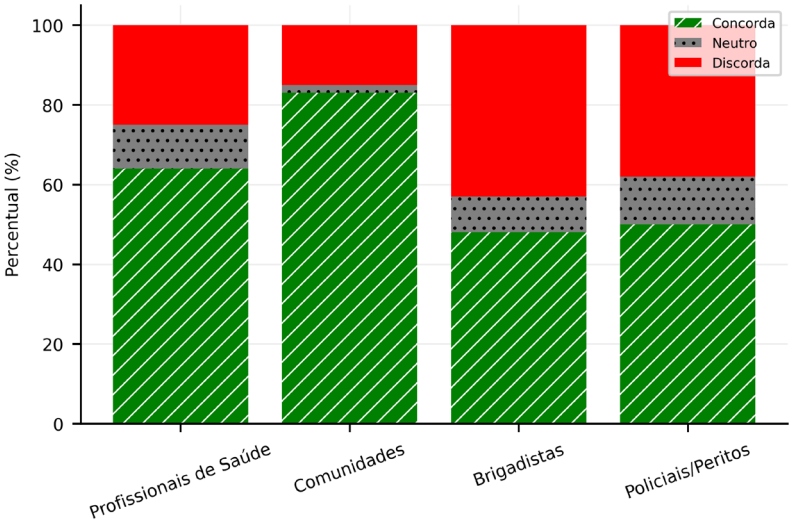
Figura 33 – Percepções sobre os impactos das queimadas na saúde, por perfil (concorda/neutro/discorda; n = 124)



Fonte: elaboração própria, a partir de questionário aplicado pelo autor.

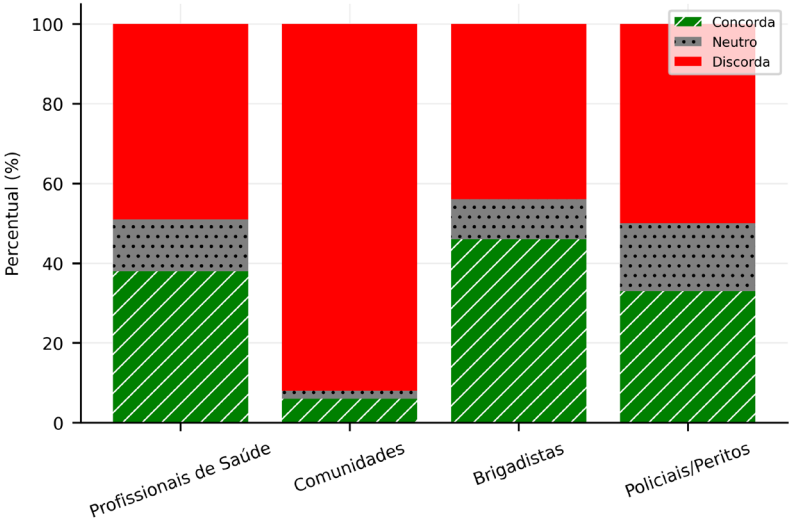


Figura 34 – Percepções sobre as causas das queimadas, por perfil (n = 124)



Fonte: elaboração própria, a partir de questionário aplicado pelo autor.

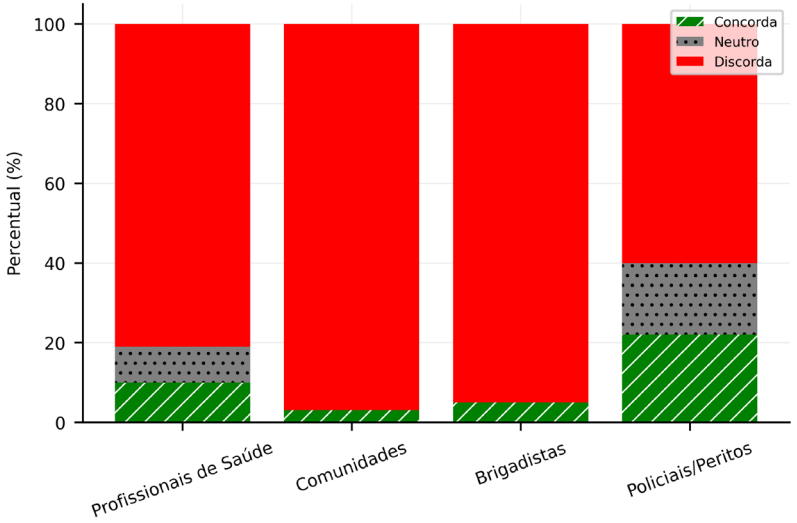
Figura 35 – Avaliação das políticas públicas, por perfil (n = 124)



Fonte: elaboração própria, a partir de questionário aplicado pelo autor.



Figura 36 – Percepções sobre responsabilização e impunidade, por perfil (n = 124)



Fonte: elaboração própria, a partir de questionário aplicado pelo autor.

Há consenso transversal em dois pontos: 97% das comunidades e 95% dos brigadistas percebem impunidade generalizada; 92% das comunidades avaliam as políticas como insuficientes. 83% das comunidades e 64% dos profissionais de saúde apontam a origem humana e ilegal como causa dominante dos incêndios. A integração entre esses dados perceptivos e os achados quantitativos anteriores reforça o diagnóstico de fragmentação das respostas institucionais.

Vista em conjunto, a leitura dos quatro perfis sugere uma imagem simples: cada setor enxerga sobretudo aquilo que vive — a saúde vê a doença; os bombeiros, o combate; a fiscalização e a justiça, o crime; e as comunidades, o abandono. Ainda assim, há dois pontos de convergência entre todos: o reconhecimento de que as queimadas produzem impactos sanitários graves e a percepção de que as políticas públicas e os mecanismos de responsabilização falham. O obstáculo central, nesse diagnóstico compartilhado, não é apenas o fogo, mas a fragmentação burocrática e a postura reativa



das instituições; o caminho inverso aponta para um sistema mais proativo, territorializado e participativo.

A integração entre as evidências quantitativas, a modelagem de painel municipal, a sazonalidade descritiva e as percepções institucionais revelou não apenas a magnitude relevante do problema, mas também gargalos concretos relacionados à integração interinstitucional, fragilidades investigativas, limitações de monitoramento e desafios metodológicos para quantificação mais sólida dos impactos. Esse mapeamento de lacunas constitui o ponto de partida necessário para a discussão das respostas desenvolvida no Capítulo 3.

2.10 SÍNTESE: CARGA SANITÁRIA, VULNERABILIDADE E DIREITOS HUMANOS

Os resultados apresentados neste capítulo indicam que os impactos sanitários dos incêndios florestais são mais amplos, persistentes e desigualmente distribuídos do que é normalmente captado pelos sistemas convencionais de monitoramento. As associações mais robustas concentram-se na via cardiovascular (associada ao PM2.5) e nos agravos oculares (associados aos focos), com efeito amplificado na Amazônia Legal e concentrado nos meses de maior atividade do fogo, sobretudo em setembro; já os agravos de mecanismo mais difuso, como as doenças infecciosas e as zoonoses, não apresentaram efeito robusto uma vez controladas a sazonalidade e o clima.

O conceito de tríplice vulnerabilidade amazônica proposto neste trabalho procura sintetizar essa realidade. Os territórios mais expostos ao fogo frequentemente coincidem com aqueles que apresentam maiores dificuldades de acesso aos serviços de saúde, menor capacidade institucional de resposta e maior



dependência dos recursos ambientais afetados pelos incêndios. Nesses contextos, os efeitos sanitários tendem a ser amplificados e a recuperação mais lenta.

Os resultados possuem ainda uma implicação prática direta: como demonstrado na seção 2.3, na Amazônia os focos do INPE e a área queimada são *proxies* de rastreio mais informativos do que o PM2.5 lido de forma bruta. Daí uma oportunidade concreta de aperfeiçoamento dos sistemas de vigilância epidemiológica: a integração sistemática dos dados diários do INPE às rotinas de monitoramento em saúde pública.

Sob a perspectiva dos direitos humanos, os resultados podem ser lidos diretamente pelos critérios que o Comentário Geral n.º 14 do Comitê DESC fixou para o direito à saúde (seção 1.4). A disponibilidade é comprometida pelo déficit de leitos e de unidades de saúde nas regiões mais expostas (seção 2.5); a acessibilidade, pelas barreiras geográficas e econômicas que os próprios coeficientes negativos da área queimada sugerem, com a população deixando de alcançar o serviço justamente quando a fumaça é mais intensa; a aceitabilidade, pela inadequação da rede às especificidades culturais e logísticas da atenção à saúde indígena (seção 2.6.1); a qualidade, pela sobrecarga sazonal que concentra a demanda nos meses de fogo; e a não discriminação é frontalmente atingida pelo próprio gradiente regional, que faz recair o maior dano sobre quem tem menor capacidade de se proteger e menos participa dos benefícios econômicos das atividades que alimentam o fogo. Os impactos sobre a saúde, os custos para o SUS e as dificuldades de acesso revelam, assim, um problema que transcende a dimensão ambiental e assume relevância simultaneamente sanitária, jurídica e distributiva.

O capítulo seguinte examina em que medida os instrumentos jurídicos, institucionais, tecnológicos e periciais atualmente disponíveis são capazes de responder a esse diagnóstico e contribuir para a prevenção, o monitoramento e a responsabilização associados aos incêndios florestais.



3

O FOGO QUE SE ENFRENTA:

INSTRUMENTOS JURÍDICOS, TECNOLÓGICOS E FORENSES DE RESPONSABILIZAÇÃO



Os dois capítulos anteriores construíram um diagnóstico. O Capítulo 1 documentou por que os incêndios ocorrem: a lógica econômica da fronteira agropecuária, a fragilidade das instituições de fiscalização e a desigualdade territorial que concentra o fogo sobre as populações mais vulneráveis. O Capítulo 2 documentou o que os incêndios fazem com a saúde das pessoas: quais doenças, com que defasagem temporal, em que magnitude e com que custo para o sistema público de saúde. Este capítulo fecha o percurso com a pergunta mais difícil: o que está sendo feito para enfrentar esse problema, e o que poderia ser feito diferente?

Essa questão não é nova. Ao analisar a trajetória recente da Amazônia, Andrade (2016) argumenta que a incapacidade histórica dos sucessivos governos brasileiros de responder de forma efetiva às crises econômicas e sociais enfrentadas pelas populações tradicionais tem contribuído para a crescente destruição dos recursos naturais em seus territórios, especialmente das florestas, bem como para processos de exclusão e expropriação territorial. Para o autor, a formulação e a implementação de políticas consistentes de desenvolvimento local e regional constituem condição necessária para reduzir a degradação ambiental e assegurar a permanência dessas populações em seus territórios. Sob essa perspectiva, os incêndios florestais não podem ser compreendidos apenas como um problema ecológico, mas também como um fenômeno associado à vulnerabilidade social, à precarização das condições de vida e às dificuldades de acesso a direitos fundamentais. Seus efeitos alcançam diretamente a saúde das populações expostas, comprometem meios de subsistência tradicionais e evidenciam limitações persistentes da capacidade estatal de proteção social e ambiental. Assim, a discussão sobre responsabilização desenvolvida neste capítulo insere-se em um debate mais amplo sobre a efetivação dos direitos humanos, incluindo o direito à saúde, ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e à proteção dos territórios tradicionalmente ocupados.



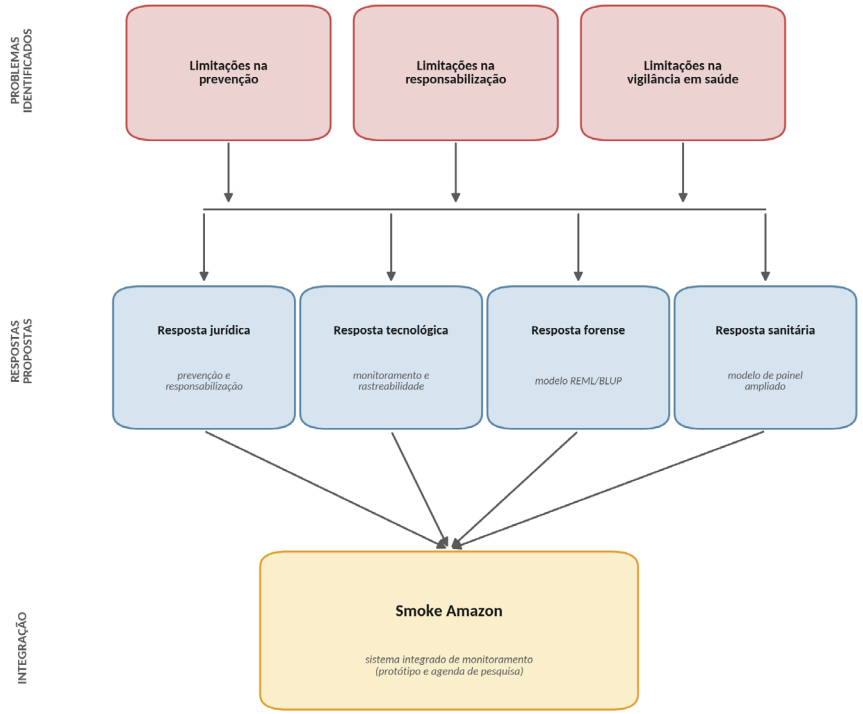
Convém, antes de prosseguir, afastar uma leitura equivocada. Este capítulo não é um catálogo de soluções tecnológicas ou jurídicas avulsas, justapostas ao diagnóstico por conveniência. Cada resposta aqui examinada nasce de um limite concreto, identificado empiricamente nos capítulos anteriores e, sobretudo, nas próprias falas dos atores ouvidos no questionário (seção 2.9). À lacuna de prevenção e à descrença quase unânime na responsabilização correspondem as respostas jurídica e regulatória; à dificuldade de converter dados em prova investigativa, relatada por brigadistas e agentes de fiscalização, corresponde o modelo forense REML/BLUP; e à incapacidade de dimensionar o custo sanitário do fogo, a chamada cegueira institucional recíproca dos gestores, corresponde o modelo de painel ampliado. O protótipo *Tatatinga* é a tentativa de reunir essas respostas em um único instrumento acessível. O capítulo, portanto, não muda de assunto: leva o diagnóstico às suas consequências. A Figura 37 sintetiza essa progressão, dos limites identificados às respostas e à sua integração.

A resposta é organizada em seis dimensões complementares. A primeira é a dimensão jurídica nacional: quais instrumentos legais o Brasil tem para enfrentar o problema, e o que mudou nos últimos anos. A segunda é a dimensão regulatória transnacional, particularmente o EUDR como instrumento de pressão de mercado. A terceira é a dimensão tecnológica: monitoramento por satélite, rastreabilidade pecuária e integração de bases. As dimensões quarta e quinta examinam dois modelos forenses originais, um voltado à investigação criminal e outro à quantificação da carga sanitária. A sexta dimensão integra as anteriores no protótipo *Tatatinga*. Lidas em conjunto, essas seis dimensões não se justapõem ao acaso, mas compõem uma progressão: a norma define o dever, o incentivo econômico estimula o seu cumprimento, os dados tornam o problema visível, os modelos forenses convertem esses dados em evidência e a integração articula todos esses elementos, etapa sem a qual a informação dificilmente se converte em responsabilização efetiva.



Em todas essas dimensões, a lente de leitura permanece a mesma: o que os dados e os instrumentos disponíveis revelam sobre a capacidade do Estado de cumprir suas obrigações de direitos humanos em relação às populações expostas ao fogo. As percepções institucionais documentadas no Capítulo 2 (seção 2.9) atravessam transversalmente este capítulo, fundamentando criticamente cada uma das respostas examinadas.

Figura 37 – Da identificação empírica dos limites às respostas propostas e à sua integração no protótipo *Tatatinga*



Fonte: elaboração própria.



3.1 RESPOSTAS JURÍDICAS NACIONAIS: INSTRUMENTOS, AVANÇOS E LIMITES

O diagnóstico do questionário, consistente com os dados objetivos dos capítulos anteriores, aponta para dois problemas centrais: impunidade persistente e políticas insuficientes. A questão que se coloca é: quais instrumentos jurídicos o ordenamento brasileiro oferece para enfrentar esses problemas, e por que eles não têm sido suficientes?

O ponto de partida necessário é reconhecer que o problema não é, em primeiro lugar, falta de legislação. O Brasil tem um conjunto normativo ambiental robusto: o Código Florestal de 2012 (Brasil, 2012), a Lei de Crimes Ambientais de 1998 (Brasil, 1998), a Constituição Federal de 1988 com seu art. 225 (Brasil, 1988), e agora a recém-criada Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF) (Brasil, 2024a). O que falta, como o questionário documenta com clareza, é a tradução dessas normas em responsabilização efetiva. E essa tradução depende de capacidade institucional, de recursos, de coordenação e de vontade política, não apenas de mais legislação.

A leitura jurídica proposta não decorre de um único indicador isolado, mas da convergência entre evidências empíricas, percepção institucional e parâmetros normativos de proteção. Os achados suscitam preocupações juridicamente relevantes sob a ótica do direito à saúde e convergem com a hipótese de incompatibilidade estrutural entre a resposta institucional observada e obrigações de proteção, ainda que não configurem prova causal individualizada.

O princípio da precaução oferece o enquadramento jurídico mais adequado para essa realidade. Na formulação de Aragão (2008), trata-se de um princípio de justiça em sentido clássico, que protege sobretudo a parte mais frágil, aqueles que não têm condições de se proteger a si próprios, e responsabiliza quem tem o poder



e o dever de controlar os riscos. Essa formulação é diretamente aplicável ao contexto das queimadas amazônicas: as populações indígenas, ribeirinhas e quilombolas, que menos contribuem para os incêndios, são as que mais sofrem os seus efeitos, enquanto quem tem o poder econômico para iniciar o ciclo do fogo ilegal e quem tem a responsabilidade institucional de coibi-lo têm, ambos, falhado sistematicamente na proteção dos mais expostos. O princípio da precaução, complementado pelas dimensões europeias sistematizadas por Aragão (2010) no que respeita à gravidade, extensão, irreversibilidade e complexidade dos impactos, fornece a base normativa para que se exija resposta estatal proporcional à magnitude do risco documentado empiricamente nesta pesquisa.

3.1.1 A POLÍTICA NACIONAL DE MANEJO INTEGRADO DO FOGO (LEI N.º 14.944/2024)

A Lei n.º 14.944/2024, que institui a PNMIF, representa a mudança mais estrutural no marco normativo brasileiro de gestão do fogo desde o Código Florestal. Como descrito no Capítulo 1, ela corrige uma distorção histórica: a legislação anterior tratava todo uso do fogo como ilícito, sem distinguir o manejo tradicional indígena do incêndio criminoso associado à grilagem. A nova lei reconhece o uso prescrito e controlado do fogo como prática técnica legítima e cria um sistema de planejamento, autorização e controle que, se implementado adequadamente, pode reduzir tanto os incêndios ilegais quanto a criminalização injusta de práticas tradicionais (Perazzoni, 2025a).

Os dados consolidados de 2025 confirmaram a tendência de queda. Segundo o BDQueimadas, de janeiro ao início de outubro de 2025 o Brasil registrou 84.896 focos, ante 218.765 no mesmo período de 2024, uma redução de 61%, com recuo de cerca de 78% na Amazônia (INPE, 2025b). Mas é importante resistir à conclusão precipitada de que a lei, por si só, produziu esse resultado. As condições



climáticas mais favoráveis de 2025, sem o El Niño que havia agravado a seca de 2024, contribuíram de forma independente para reduzir os incêndios. O efeito dissuasório do Decreto n.º 12.189/2024 (Brasil, 2024b), que elevou substancialmente as multas, também pode ter contribuído. E há, certamente, um papel da política pública. A atribuição precisa de quanto cada fator contribuiu requereria análise econométrica específica, que ainda não foi realizada.

O que os dados do questionário deixam claro é que a implementação efetiva da PNMIF depende de condições que ainda não estão garantidas: capacidade administrativa dos estados e municípios, que são os entes responsáveis pela maior parte da execução; formação técnica das burocracias locais para distinguir uso prescrito de incêndio ilegal; e financiamento estável e previsível, que os questionários identificam como percebido como insuficiente por 31% a 54% dos respondentes em todos os grupos.

A essas condições de capacidade e financiamento soma-se um obstáculo de natureza política. Figueira (2004), ao analisar a relação entre latifúndio, impunidade e Estado no Brasil, documenta que a persistência da ilegalidade fundiária não resulta de ausência de normas, mas da capacidade dos grandes proprietários rurais de neutralizar a aplicação dessas normas por dentro das próprias instituições. A força da chamada bancada ruralista no Congresso, que historicamente inviabilizou legislação ambiental mais exigente e que continua a pressionar pela suavização das sanções, é o mecanismo político que mantém o *gap* entre a norma formalmente robusta e a implementação efetiva. Esse diagnóstico, embora formulado originalmente para o contexto do trabalho escravo e da grilagem, aplica-se com precisão estrutural ao domínio das queimadas: a impunidade não é um subproduto involuntário das limitações institucionais, é frequentemente um resultado produzido ativamente pela captura política dos mecanismos de controle.



A opção brasileira pelo manejo integrado do fogo não constitui um desenvolvimento isolado do nosso ordenamento. Portugal percorreu trajetória normativa análoga e anterior: após os incêndios de 2017, aprovou o Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais, pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020, de 16 de junho, e, no ano seguinte, o Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, que instituiu o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais e o confiou a uma agência criada para esse fim, reforma analisada em detalhe pelo Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra (Antunes; Lopes, 2021). Dois Estados com biomas e causas predominantes do fogo distintos chegaram, com quatro anos de intervalo, ao mesmo diagnóstico: o de que a supressão isolada é insuficiente e o de que o fogo deve ser objeto de gestão, e não apenas de proibição. Esse reconhecimento, inclusive da legitimidade do uso tradicional do fogo, tampouco se limita ao mundo lusófono: no Canadá, onde a proibição colonial das queimadas indígenas a partir de 1874 contribuiu para o acúmulo de combustível associado aos incêndios recordes recentes, a Nação Tŝilhqot'in viu reconhecida, em acordo firmado com os governos provincial e federal em 2018 e renovado em 2022, a autoridade sobre o manejo tradicional do fogo em seu território (Stacey *et al.*, 2025).

A experiência portuguesa é igualmente instrutiva quanto ao obstáculo examinado nesta seção, embora por contraste. Aragão (2020) demonstra que, mesmo num ordenamento em que o uso indevido do fogo é punido com moldura penal equivalente à de crimes como o roubo e o peculato, e em que o legislador chegou a prever presunções de intencionalidade e a possibilidade de vigilância eletrônica do agente durante o período crítico, o efeito dissuasor permanece limitado, razão pela qual sustenta que o direito florestal precisa incorporar a comunicação persuasiva como instrumento próprio. A literatura reunida pelo Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra documenta dificuldade equivalente



na escala municipal (Antunes; Lopes, 2019, 2021; Antunes; Lopes; Oliveira, 2020), e a avaliação mais recente do sistema português acrescenta uma explicação de economia política que se aplica sem esforço ao caso brasileiro: deslocar prioridades para a prevenção de longo prazo é difícil porque a prevenção bem-sucedida é muito menos visível do que a resposta à emergência (Viegas *et al.*, 2026).

Os instrumentos, contudo, não são intercambiáveis, e a razão está na distribuição de causas exposta no Capítulo 1. Onde a maioria das ocorrências resulta de negligência, isto é, de condutas humanas que não visavam provocar o incêndio, como nos 53% das ocorrências investigadas em Portugal em 2018, a comunicação persuasiva atua sobre a causa efetiva do problema: o descuido, que a informação e a mudança de comportamento podem corrigir. Onde o fogo é meio de um cálculo econômico deliberado, como na fronteira agropecuária amazônica, nenhuma campanha de sensibilização substitui a capacidade de investigar, provar e punir, pois não há desconhecimento a corrigir, mas incentivo a neutralizar. O gargalo brasileiro documentado nesta seção não é, portanto, de persuasão, mas de efetividade da persecução.

3.1.2 A ATUAÇÃO DA ADVOCACIA-GERAL DA UNIÃO, DO MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL E A JURISPRUDÊNCIA DO SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL

Além da legislação, o sistema jurídico brasileiro dispõe de instrumentos de responsabilização que, quando acionados com evidências técnicas sólidas, possuem elevado potencial de efetividade. Como já mencionado, em janeiro de 2025, a Advocacia-Geral da União (AGU) ajuizou ação civil pública pleiteando a reparação de aproximadamente R$ 725 milhões em danos ambientais decorrentes de incêndios e outras infrações ambientais no Pantanal. A ação foi



proposta contra três proprietários rurais investigados por práticas relacionadas ao desmatamento, uso irregular do fogo e ocupação de áreas públicas, sendo fundamentada em laudos técnicos de georreferenciamento que permitiram identificar os polígonos queimados e vincular as áreas afetadas aos respectivos responsáveis (Perazzoni, 2025b). Embora o processo ainda esteja em tramitação no momento da elaboração desta pesquisa, a iniciativa representa um marco na política brasileira de responsabilização ambiental por incêndios florestais, ao buscar não apenas a recuperação das áreas degradadas, mas também a reparação dos danos ecológicos e dos serviços ecossistêmicos perdidos, materializando a aplicação do princípio do poluidor-pagador.

Nesse mesmo sentido, a atuação do Ministério Público Federal (MPF) evidencia a utilização de instrumentos extrajudiciais de governança ambiental voltados à prevenção de ilícitos em cadeias produtivas associadas à degradação florestal. Destaca-se o denominado "TAC da Carne", conjunto de Termos de Ajustamento de Conduta firmados a partir de 2009 com frigoríficos atuantes na Amazônia Legal, por meio dos quais se estabeleceram mecanismos de controle da origem do gado destinados a restringir a comercialização de animais provenientes de áreas associadas ao desmatamento ilegal e outras irregularidades socioambientais (Ministério Público Federal – MPF, 2009). Trata-se de instrumento que desloca parte da responsabilidade pelo controle ambiental para agentes econômicos privados, reforçando estratégias de indução de conformidade regulatória. Sua relevância para os sistemas contemporâneos de rastreabilidade e para a implementação do EUDR será examinada com maior detalhe na Seção 3.2.1.

No âmbito da jurisdição constitucional, o Supremo Tribunal Federal (STF) também tem desempenhado papel central na consolidação de uma agenda climática e ambiental vinculada a direitos fundamentais. A ADPF 760, ao tratar da omissão estatal no controle



do desmatamento na Amazônia (STF, 2024), e a ADPF 708, ao reconhecer falhas estruturais na implementação de políticas climáticas (STF, 2022), estabelecem parâmetros relevantes para a responsabilização estatal em matéria ambiental. Esses precedentes podem ser mobilizados em litígios futuros envolvendo incêndios florestais e seus impactos sanitários e climáticos, reforçando a compreensão do meio ambiente como direito fundamental de eficácia imediata.

A efetividade desses mecanismos depende, contudo, de superar obstáculos estruturais relacionados à assimetria de poder na produção e contestação de evidências ambientais. Em contextos marcados pela atuação de redes de criminalidade ambiental organizada, frequentemente observam-se estratégias de enfraquecimento institucional e contestação técnica das provas produzidas por órgãos de fiscalização (Pereira; Perazzoni, 2024). Nesses casos, a eficácia dos instrumentos jurídicos não depende apenas de sua existência formal, mas da capacidade institucional de garantir integridade na produção de evidências, coordenação entre órgãos de controle e resistência a mecanismos de captura regulatória.

3.1.3 O DIREITO CONSTITUCIONAL AMAZÔNICO E A HERMENÊUTICA TERRITORIALIZADA

Uma das contribuições mais relevantes do debate jurídico recente ao tema dos incêndios é a proposta de um direito constitucional amazônico, que não constitui um novo ramo jurídico autônomo, mas uma exigência metodológica e hermenêutica: um modo de interpretar e aplicar os direitos fundamentais da Constituição de 1988 que reconhece as assimetrias históricas, territoriais e institucionais da região como condição da sua efetivação (Perazzoni; Cascardo Junior, 2026). A dogmática centralizada, ao abstrair o processo singular de formação da Amazônia, produz ineficácia material crônica



e reproduz padrões de colonialidade interna. Quando o Direito é formalmente válido, mas materialmente ineficaz, a sua aplicação na região converte-se em injustiça constitucional crônica. O argumento central é que o art. 225 da Constituição não pode ser interpretado da mesma forma para um município do interior de São Paulo e para um município ribeirinho do Pará com 40% da população sem leitos hospitalares e acesso a serviços de saúde dependente de barco.

Essa leitura territorializada encontra fundamento expresso na própria Constituição. A redução das desigualdades regionais é objetivo fundamental da República (arts. 3º, III, e 43), e o art. 225, §4º, confere à Amazônia Legal o status de área de relevante interesse ecológico nacional, impondo à União disciplina normativa específica (Brasil, 1988). A força normativa da Constituição e a centralidade dos direitos fundamentais exigem, assim, que a proteção ambiental, os direitos territoriais dos povos indígenas e comunidades tradicionais e a eficácia material dos direitos fundamentais sejam lidos à luz das condições concretas do território, e não de uma média nacional abstrata.

Essa hermenêutica territorializada tem respaldo no direito internacional. O Comentário Geral n.º 14 do Comitê DESC, sobre o direito à saúde, reconhece explicitamente que a acessibilidade geográfica é um componente essencial do direito (Moreira; Gomes, 2013): não basta que os serviços existam em algum lugar do território nacional se não estão acessíveis às populações que deles necessitam. Aplicada ao contexto dos incêndios, essa interpretação implica que o Estado tem obrigação reforçada de garantir infraestrutura de saúde nas regiões de maior exposição ao fogo, precisamente porque a ausência dessa infraestrutura intensifica desproporcionalmente os danos sobre as populações mais vulneráveis.



3.2 RESPOSTAS REGULATÓRIAS TRANSNACIONAIS: O EUDR E O MERCADO COMO INSTRUMENTO DE PROTEÇÃO DE DIREITOS HUMANOS

O ordenamento jurídico brasileiro não opera em isolamento. As queimadas amazônicas são um problema com dimensão global: afetam o clima em escala planetária, implicam cadeias produtivas que exportam para mercados internacionais regulados por normas de sustentabilidade, e envolvem violações de direitos humanos reconhecidos por instrumentos internacionais. O direito internacional, tanto na sua dimensão comercial quanto na sua dimensão de direitos humanos, cria pressões e oportunidades que complementam os instrumentos nacionais.

3.2.1 O EUDR: RASTREABILIDADE, MERCADO E INCENTIVOS ECONÔMICOS PARA O FIM DAS QUEIMADAS ILEGAIS

O Regulamento Europeu sobre Produtos Livres de Desmatamento da União Europeia, conhecido como *European Union Deforestation Regulation* (EUDR), entrou em vigor em 2023 e exige que determinadas *commodities* exportadas para a União Europeia, entre as quais carne bovina, soja, madeira, cacau e café, sejam acompanhadas de evidência verificável de que sua produção não esteve associada a desmatamento ou degradação florestal ocorridos após 31 de dezembro de 2020 (UE, 2023; Filippin *et al.*, 2025; Bichara *et al.*, 2025a). No caso da pecuária, o artigo 9º do regulamento determina que cada produto bovino seja acompanhado de informação geolocalizada de todos os lotes de terra por onde o animal passou durante



a sua vida produtiva. Na prática, isso exige que três bases de dados operem em conjunto: o SISBOV (Sistema Brasileiro de Identificação e Certificação de Origem Bovina e Bubalina), que identifica individualmente cada bovino e rastreia os imóveis por onde transitou; o CAR (Cadastro Ambiental Rural), registro público de âmbito nacional gerido pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB) por meio do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), no qual todo imóvel rural declara seus limites georreferenciados e suas áreas protegidas (Serviço Florestal Brasileiro – SFB, 2025), que geolocaliza esses imóveis; e o PRODES (INPE, 2025c), que registra desmatamento e queimadas. Se o polígono de qualquer propriedade por onde o animal passou apresentar queimada ilegal detectada pelo INPE após a data de corte, o produto não pode ser exportado para a Europa.

A conexão com o fogo é direta. Como o Capítulo 1 documentou, entre 60% e 70% das áreas desmatadas na Amazônia são convertidas em pastagens em até três anos, e boa parte dessas conversões passa pelo fogo como instrumento de limpeza. Ao condicionar o acesso ao mercado europeu à ausência de queimada ilegal na cadeia de origem, o EUDR cria um incentivo econômico que o direito penal brasileiro, apesar de robusto em sua letra, não conseguiu produzir na prática. Para o produtor que exporta carne para a Europa, queimar ilegalmente passa a ter um custo de mercado imediato, a perda de acesso a um parceiro que absorve entre 15% e 20% das exportações brasileiras de carne bovina, superior às sanções administrativas domésticas historicamente percebidas como toleráveis. A sanção de mercado precede e independe da sanção penal.

Do ponto de vista dos direitos humanos, esse mecanismo dá expressão concreta ao argumento de Aragão (2010) sobre o uso de instrumentos econômicos como meios complementares de proteção ambiental: a rastreabilidade georreferenciada obrigatória, imposta por um regulamento de comércio externo, converte os dados de satélite do INPE em consequências econômicas reais para quem queima. Trata-se, como sistematiza Aragão (2014), de uma aplicação



do princípio do poluidor-pagador em contexto de cadeia global de valor, na qual os custos ambientais das queimadas, usualmente externalizados para as populações locais e para o erário público, passam a ser internalizados pelos agentes que se beneficiam da atividade. A lógica do poluidor-pagador deixa de operar apenas no plano da sanção administrativa ou penal e passa a operar também no plano da exclusão do mercado. Esse efeito insere-se no quadro mais amplo do Efeito Bruxelas, a capacidade da União Europeia de moldar comportamentos produtivos em países terceiros pela via do acesso ao seu mercado, no qual o EUDR figura entre os instrumentos com maior potencial de impacto sobre a cadeia pecuária amazônica (Bichara *et al.*, 2025b).

O enquadramento do EUDR encontra fundamento adicional na doutrina do princípio da precaução desenvolvida para o espaço europeu. Aragão (2010), ao sistematizar as dimensões desse princípio, identifica os critérios objetivos de avaliação da gravidade dos riscos ambientais que devem orientar a intervenção regulatória: a extensão geográfica e populacional do impacto, a sua magnitude, a complexidade dos mecanismos causais, a probabilidade de ocorrência, a duração e a frequência do fenômeno, a sua reversibilidade ou irreversibilidade e, em especial, a natureza transfronteiriça dos danos. As queimadas amazônicas satisfazem, em larga medida, esses critérios: têm extensão de milhões de hectares, magnitude comprovada sobre os sistemas climáticos hemisféricos, mecanismos causais bem documentados pela ciência, frequência anual estabelecida, irreversibilidade parcial dos ecossistemas destruídos e impactos transfronteiriços que alcançam a qualidade do ar em cidades de outros continentes. Nessa leitura, o EUDR não é apenas um instrumento comercial de rastreabilidade, mas uma expressão regulatória do princípio da precaução aplicado a riscos ambientais com dimensão transfronteiriça originados em práticas agropecuárias de países terceiros.



Essa leitura do EUDR como expressão regulatória do princípio da precaução articula-se com a distinção que Aragão (2025) propõe entre o direito da ecoinovação e a ecoinovação jurídica. O direito da ecoinovação reúne o conjunto de normas (instrumentos legais, fiscais e contratuais) que incentivam a inovação tecnológica e organizacional em favor da sustentabilidade; a ecoinovação jurídica designa a transformação das próprias estruturas normativas e metodológicas do direito para enfrentar a crise ecológica contemporânea. O EUDR pode ser lido nas duas chaves: como direito da ecoinovação, ao mobilizar um instrumento de comércio para induzir práticas produtivas sustentáveis; e como ecoinovação jurídica, ao reconfigurar a própria gramática da responsabilização ambiental, deslocando-a da sanção administrativa ou penal para a exclusão do mercado e ancorando-a em rastreabilidade georreferenciada e prova de origem.

Nessa leitura, a sinergia entre as soluções normativas do EUDR e a ecoinovação jurídica reforça a reconfiguração da governança ambiental que perpassa este capítulo: a internalização dos custos ambientais preconizada pelo princípio do poluidor-pagador deixa de depender exclusivamente do aparato sancionatório estatal e passa a operar também pela via do acesso ao mercado, combinando inovação jurídica e sustentabilidade num mesmo instrumento.

A capacidade de o EUDR produzir os efeitos esperados não depende apenas da regulação europeia, mas também da infraestrutura brasileira de monitoramento, rastreabilidade e enforcement. Nesse ponto, o quadro institucional é mais avançado do que a discussão pública costuma reconhecer. Conforme mencionado na Seção 3.1.2, os Termos de Ajustamento de Conduta (TACs) firmados pelo Ministério Público Federal com frigoríficos atuantes na Amazônia constituem um dos principais antecedentes nacionais dos mecanismos de rastreabilidade atualmente exigidos pelo EUDR. A operacionalização desses compromissos é orientada pelo Protocolo de Monitoramento de Fornecedores de Gado da Amazônia, em sua versão 2.0 de julho de 2024 (Imaflora; Boi na Linha, 2024), de



adoção obrigatória desde 1º de janeiro de 2025, que articula precisamente os três elementos exigidos pelo EUDR: o CAR como base georreferenciada dos imóveis, o PRODES/INPE como detector de desmatamento e a Guia de Trânsito Animal (GTA) como instrumento de rastreabilidade da movimentação dos animais. A lacuna que o EUDR endereça não é a inexistência de um arcabouço regulatório nacional, mas a sua aplicação parcial, limitada aos fornecedores diretos e omitindo os fornecedores indiretos, onde ocorre a "lavagem de gado" documentada pela Anistia Internacional (2020). Ao exigir rastreabilidade individual do animal desde o nascimento e ao operar com a sanção concreta de exclusão do mercado europeu, o regulamento fecha uma brecha estrutural que o arcabouço brasileiro, sozinho, não tinha conseguido fechar. EUDR e Protocolo Boi na Linha, portanto, não competem nem se duplicam: o regulamento europeu adiciona o componente de pressão de mercado mandatória que faltava à resposta doméstica, fazendo o custo do fogo ilegal recair, pela primeira vez de forma economicamente significativa, sobre quem dele se beneficia.

Há ainda uma dimensão do EUDR que merece ser explicitada, porque ilumina o seu sentido mais profundo. A linguagem dos direitos humanos nasceu, historicamente, para conter o poder do Estado: foi contra abusos estatais que se ergueram as primeiras declarações e os sistemas internacionais de proteção. No mundo contemporâneo, porém, alguns dos maiores violadores desses direitos não são os Estados, mas atores privados, em especial grandes empresas cujas cadeias produtivas atravessam fronteiras e escapam ao controle de qualquer jurisdição isolada. Foi a esse novo equilíbrio de forças que responderam os Princípios Orientadores sobre Empresas e Direitos Humanos, endossados por unanimidade pelo Conselho de Direitos Humanos da ONU em 2011, ao consagrarem que cabe ao Estado proteger contra violações cometidas por terceiros, inclusive empresas, e às empresas o dever de respeitar os direitos humanos ao longo de suas operações (ONU, 2011). É nesse



quadro que normas de comércio como o EUDR adquirem a sua dimensão menos evidente e mais relevante: ao condicionar o acesso ao mercado à ausência de dano ambiental na origem, uma regra aparentemente comercial converte-se em instrumento transversal de proteção de direitos humanos, e do direito à saúde em particular, alcançando, pela via do mercado, condutas privadas que a regulação estatal direta não conseguiu coibir. Sob essa ótica, instrumentos como o EUDR não são apenas úteis, mas necessários: suprem, ainda que parcialmente, a lacuna de responsabilização deixada pela dificuldade dos Estados em disciplinar os agentes econômicos que mais pressionam a floresta.

Esse potencial, contudo, não deve ser superestimado. A trajetória recente do regulamento é marcada por instabilidade normativa que reduz, ao menos no curto prazo, a sua eficácia. Em dezembro de 2025, o Regulamento Europeu n.º 2025/2650 (União Europeia – UE, 2025c) promoveu um segundo adiamento da aplicação do EUDR: as obrigações passaram a incidir somente a partir de 30 de dezembro de 2026 para grandes e médios operadores e de 30 de junho de 2027 para micro e pequenos operadores, prazos que, somados ao adiamento anterior, empurram para o fim da década a vigência efetiva do mecanismo. O mesmo movimento de revisão introduziu um pacote de simplificação que dilui o alcance do regulamento: declaração única para pequenos e micro produtores primários e dispensa de declaração de diligência devida para a maioria dos atores situados a jusante na cadeia e para comerciantes que não sejam pequenas e médias empresas, o que retira de parte expressiva da cadeia o dever de comprovação que constituía o cerne do instrumento.

A fragilidade não se limita aos prazos e ao escopo. Em maio de 2025, o sistema de classificação de risco por país instituído pelo Regulamento da União Europeia n.º 2025/1093 (União Europeia – UE, 2025a), que calibra a intensidade da diligência exigida, enquadrou o Brasil como risco padrão, e não como risco alto, reservando essa



última categoria a apenas quatro países responsáveis por fração ínfima das importações cobertas. Pouco depois, em julho de 2025, o próprio Parlamento Europeu rejeitou esse sistema de classificação (UE, 2025b), por considerá-lo metodologicamente frágil e politicamente desequilibrado, lançando incerteza sobre o critério que deveria orientar a aplicação do regulamento. O resultado é paradoxal para os fins desta pesquisa: um instrumento com elevado potencial de internalizar o custo do fogo ilegal chega ao maior produtor de carne bovina da Amazônia enfraquecido em três frentes simultâneas: prazo dilatado, escopo reduzido e critério de risco contestado e brando.

A essas fragilidades normativas somam-se desafios práticos de implementação no Brasil. A exigência de rastreabilidade pressupõe infraestrutura pública robusta de dados territoriais, como o georreferenciamento completo dos imóveis rurais, a integração das bases de dados ambientais e fundiárias e sistemas digitais de comprovação de origem que ainda não estão plenamente operacionais no Brasil. Na ausência dessa infraestrutura pública, os custos de conformidade tendem a recair de forma assimétrica sobre o setor privado, podendo desfavorecer os pequenos produtores em relação aos grandes exportadores, com recursos para contratar serviços de rastreabilidade (Bichara *et al.*, 2025a). Esse risco de distribuição desigual dos custos de conformidade é uma dimensão de equidade que a política pública precisa endereçar. O EUDR permanece, no plano do desenho, a resposta de mercado mais promissora à conversão de floresta em pasto pelo fogo, mas a sua eficácia concreta, ao menos no horizonte imediato, depende tanto da estabilização normativa que ainda não ocorreu quanto da construção da infraestrutura pública de dados que o próprio regulamento pressupõe, o que reforça o diagnóstico, central neste capítulo, de que mesmo as respostas institucionais mais bem concebidas permanecem, por ora, insuficientes.



3.2.2 JURISPRUDÊNCIA CLIMÁTICA INTERNACIONAL E DIREITOS HUMANOS

Paralelamente ao desenvolvimento normativo comercial, há uma evolução acelerada na jurisprudência internacional de direitos humanos em matéria climática. A Resolução 76/300 da Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU, 2022) reconhece o direito a um ambiente limpo, saudável e sustentável como direito humano universal. A Opinião Consultiva OC-23/17 da Corte Interamericana de Direitos Humanos (2017) estabelece que os Estados têm obrigações de direitos humanos em relação a danos ambientais com impactos transfronteiriços e que populações vulneráveis têm direito à proteção reforçada.

Mais recentemente, em 23 de julho de 2025, a pedido da Assembleia Geral da ONU, o Tribunal Internacional de Justiça emitiu opinião consultiva sobre as obrigações dos Estados em relação às mudanças climáticas (Tribunal Internacional de Justiça, 2025). O parecer estabelece precedentes significativos sobre a responsabilidade estatal por omissões em matéria de proteção ambiental com impactos sobre a saúde humana.

Poucas semanas antes, em 3 de julho de 2025, a Corte Interamericana de Direitos Humanos emitira a Opinião Consultiva OC-32/25, sobre emergência climática e direitos humanos, solicitada pelo Chile e pela Colômbia em janeiro de 2023 e aprovada por quatro votos a três. O parecer interessa a esta pesquisa por três razões. Reconhece que a crise climática compromete de forma estrutural o gozo dos direitos humanos, e não apenas setorialmente o direito ao ambiente. Impõe deveres reforçados de proteção às populações em situação de vulnerabilidade, com menção expressa aos povos indígenas e às comunidades tradicionais. E atribui valor aos saberes tradicionais, locais e indígenas na formulação das políticas climáticas, ao lado do conhecimento científico, diretriz que converge com o reconhecimento do manejo tradicional do fogo pela Política



Nacional de Manejo Integrado do Fogo (seção 3.1.1). Some-se a esse conjunto o parecer consultivo do Tribunal Internacional do Direito do Mar, de 21 de maio de 2024, de modo que, em pouco mais de um ano, três jurisdições internacionais afirmaram de forma convergente deveres estatais de prevenção e de devida diligência em matéria ambiental e climática.

Esse movimento jurisprudencial acompanha o crescimento sustentado da litigância climática fundada em direitos humanos: pelo menos 230 novas ações foram propostas apenas em 2023, ano em que o contencioso climático alcançou pela primeira vez países como o Panamá e Portugal, embora somente cerca de 5% do total tramite perante cortes internacionais (Setzer; Higham, 2024). A dimensão de mobilização jurídica desse fenômeno é analisada por Rodríguez-Garavito (2022), e a realização do direito à saúde vem sendo tratada como componente central da agenda de justiça climática (IDLO, 2021). Para o objeto deste livro, a consequência é direta: a carga sanitária estimada no Capítulo 2 e os modelos forenses descritos na seção 3.5 fornecem precisamente o tipo de evidência quantificada de que essa litigância carece quando o dano invocado é sanitário e difuso.

Moreira e Gomes (2013) sublinham que o sistema internacional de direitos humanos opera por complementaridade com os sistemas nacionais: quando os mecanismos internos falham em garantir proteção adequada, os mecanismos internacionais tornam-se acessíveis como via de reparação. No contexto das queimadas, isso significa que comunidades indígenas e tradicionais cujos direitos à saúde e ao território sejam violados pelos incêndios criminosos têm, em tese, acesso a mecanismos internacionais de proteção, incluindo a Comissão Interamericana de Direitos Humanos e o sistema de relatores especiais da ONU. O acesso efetivo a esses mecanismos depende, contudo, de capacidade jurídica e organizacional que muitas dessas comunidades não possuem, o que revela mais uma dimensão da tríplice vulnerabilidade documentada no Capítulo 2.



3.3 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS: MONITORAMENTO, RASTREABILIDADE E INTEGRAÇÃO DE DADOS

As respostas ao problema das queimadas não se esgotam no plano jurídico-normativo. A infraestrutura tecnológica de dados é condição de efetividade de qualquer resposta, seja ela investigativa, sanitária ou regulatória. Esta seção examina três eixos tecnológicos complementares: o monitoramento por satélite, a rastreabilidade pecuária e a integração de bases de dados fundiárias e ambientais.

3.3.1 MONITORAMENTO POR SATÉLITE: BDQUEIMADAS, PRODES E MAPBIOMAS

O Brasil dispõe de uma das infraestruturas de monitoramento ambiental por satélite mais sofisticadas do mundo. O BDQueimadas (INPE, 2025a) produz dados diários de focos de incêndio com cobertura nacional, disponíveis gratuitamente em formato aberto. O PRODES (Programa de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite), sistema do INPE que mede, por interpretação de imagens de satélite, as taxas anuais de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal desde 1988 (INPE, 2025c), registra o desmatamento incremental anual por polígono. O MapBiomas Fogo – Coleção 4 mapeia a área queimada acumulada por município e por mês. A combinação dessas três bases, focos, desmatamento e área queimada, permite identificar, com elevada granularidade temporal e espacial, os padrões territoriais do fogo. A sua utilização como evidência técnica vem-se consolidando em duas frentes: no plano administrativo e cível, na prática da AGU e do IBAMA; e no plano penal, na investigação conduzida pela Polícia Federal e na persecução a cargo do Ministério Público, que recorrem a esses dados georreferenciados para sustentar autoria, materialidade e nexo causal nos crimes ambientais.



Os dados de focos do INPE indicam onde o fogo ocorre, mas nem sempre na resolução necessária à atribuição forense de cada evento. Essa lacuna vem sendo preenchida por plataformas de imagens de alta resolução voltadas à segurança pública. O Programa Brasil MAIS, do Ministério da Justiça e Segurança Pública, por meio da plataforma RedeMAIS, integra imagens diárias de alta resolução e alertas automáticos de detecção de mudanças, permitindo a centenas de instituições públicas validar ocorrências remotamente, delimitar polígonos e direcionar as operações de campo em áreas de difícil acesso, com redução expressiva de custo logístico (Programa Brasil MAIS, s.d.).

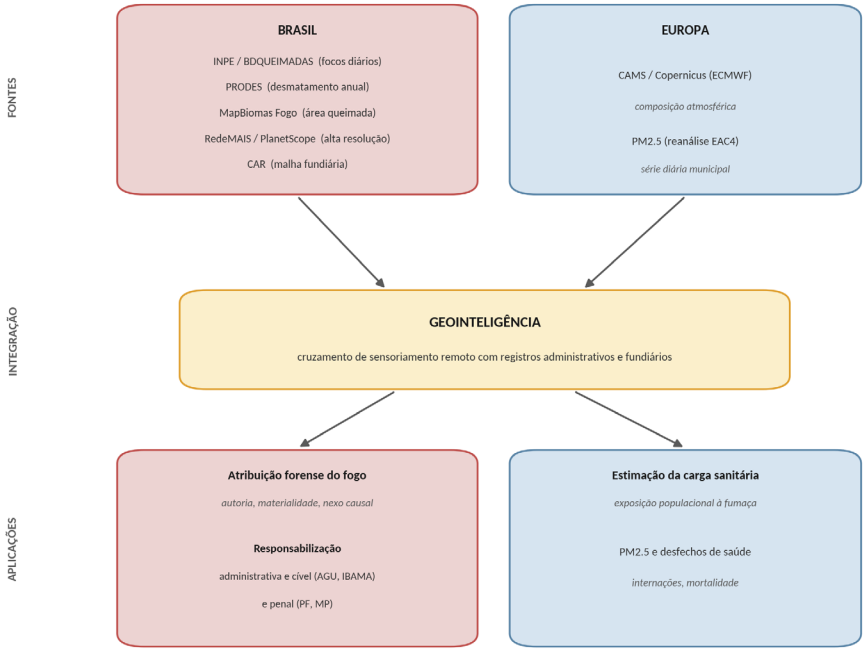
A aquisição de imagens, porém, é apenas o primeiro passo. O passo decisivo é analítico: a geointeligência, o cruzamento sistemático de dados de sensoriamento remoto com registros administrativos e documentais para revelar fraudes que nenhuma fonte isolada evidenciaria. Em regiões de grande extensão e acesso precário, onde a inspeção de campo de todas as áreas licenciadas é materialmente impossível, esse cruzamento torna-se o principal método investigativo, como na detecção de lavagem de madeira a partir do confronto entre volumes e tempos de transporte declarados e a realidade geoespacial, com apoio de testes estatísticos (Perazzoni; Bacelar-Nicolau; Painho, 2020). A mesma lógica aplica-se ao fogo: o cruzamento entre focos, polígonos de desmatamento e a malha fundiária do CAR permite atribuir o incêndio ilegal a um imóvel e a um responsável, convertendo o dado de satélite em prova.

Essa infraestrutura nacional é complementada por dados produzidos por agências europeias, dos quais as análises aqui apresentadas dependem de forma decisiva. É o caso, sobretudo, do CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*), serviço do programa europeu Copernicus operado pelo ECMWF, cuja reanálise EAC4 fornece as séries diárias municipais de material particulado fino (PM2.5) usadas para medir a exposição da população à fumaça (CAMS, 2024). Sem essa fonte, a dimensão atmosférica das análises

de saúde, incluindo o achado central sobre as internações cardiovasculares, não teria sido viável.

Cabe registrar, por fim, que a maior parte das análises empíricas deste livro repousa sobre essa infraestrutura de dados abertos: as bases geoespaciais do INPE/BDQueimadas, do PRODES e do MapBiomas, do lado brasileiro, e os dados atmosféricos do CAMS/Copernicus, do lado europeu (Figura 38). Boa parte dos resultados aqui apresentados não teria sido possível sem a disponibilização gratuita e em formato aberto desses produtos, o que constitui, em si mesmo, uma condição material desse tipo de pesquisa e um argumento adicional em favor da sua continuidade e do seu financiamento.

Figura 38 – Arquitetura de dados e geointeligência aplicada ao fogo: integração de fontes abertas brasileiras e europeias, etapa de cruzamento (geointeligência) e usos forense e sanitário



Fonte: elaboração própria.



3.3.2 RASTREABILIDADE PECUÁRIA: SISBOV, CAR E A INFRAESTRUTURA DE DADOS TERRITORIAIS

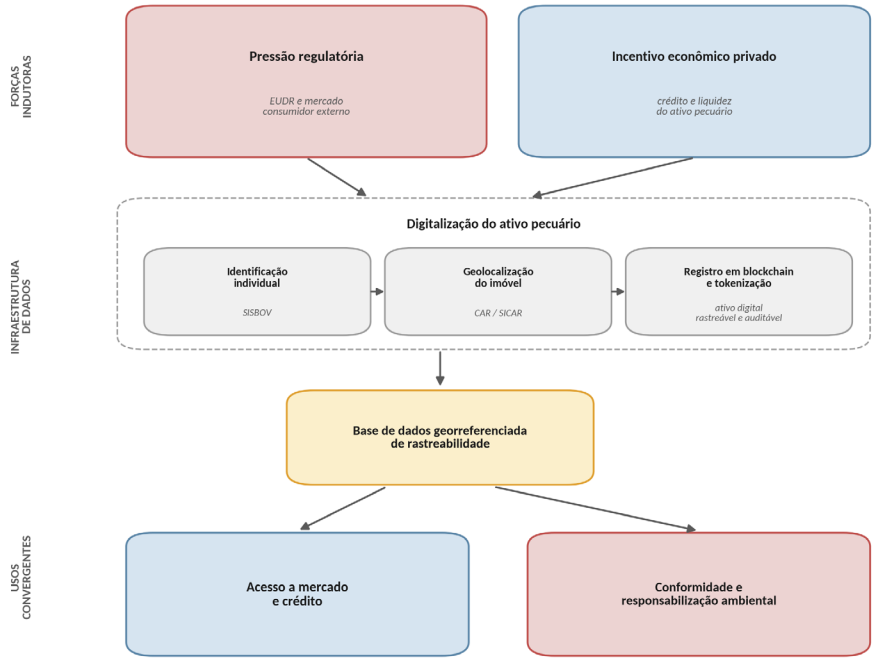
O SISBOV e o CAR são as duas tecnologias de rastreabilidade sobre as quais se apoia a resposta brasileira ao EUDR, cujo funcionamento foi descrito na seção 3.2. A adoção do SISBOV permaneceu baixa enquanto foi requisito apenas voluntário, mas o EUDR muda estruturalmente esse quadro: a partir de 30 de dezembro de 2026, com prazo estendido a 30 de junho de 2027 para micro e pequenos operadores, exportar carne bovina para a Europa sem rastreabilidade geolocalizada, que exige o SISBOV integrado ao CAR, equivale a perder o mercado europeu.

Do ponto de vista da política pública, a implementação do EUDR cria uma janela única de oportunidade: os recursos destinados à certificação de conformidade podem induzir o investimento privado na própria infraestrutura de dados que a fiscalização pública não conseguiu construir. Produtores e frigoríficos investirão em rastreabilidade porque o mercado exige; ao fazê-lo, produzirão a base de dados que os órgãos de fiscalização e o sistema de justiça precisam para responsabilização efetiva.

Convém acrescentar que essa convergência não decorre exclusivamente do EUDR. Em paralelo à pressão regulatória, iniciativas privadas de mercado vêm produzindo, por motivação própria, a mesma camada de identificação e rastreabilidade. A transformação do rebanho em ativo digital identificável, rastreável e auditável, utilizável como lastro em operações de crédito, é uma frente em expansão no agronegócio brasileiro (Perazzoni *et al.*, 2025c, 2025d), e já se materializa em ecossistemas de tecnologia para a pecuária, como a Caravan Tech, e em experiências de tokenização bovina em *blockchain*, a exemplo da primeira vaca tokenizada do Brasil, em 2024. O efeito é convergente com o objetivo regulatório: ao registrarem de forma íntegra a origem, o histórico e a movimentação de cada animal, essas soluções geram, movidas por interesse financeiro privado,

a mesma base de dados georreferenciada que a fiscalização pública não logrou construir e que o próprio EUDR pressupõe. Embora ainda incipiente, esse movimento sinaliza que a infraestrutura de rastreabilidade tende a consolidar-se pela conjugação de duas forças distintas, a pressão do mercado consumidor externo e o incentivo econômico interno à liquidez do ativo pecuário (Figura 39).

Figura 39 – Ecossistema de rastreabilidade e digitalização do ativo pecuário: convergência entre a pressão regulatória e o incentivo econômico privado



Fonte: elaboração própria.

3.3.3 INTEGRAÇÃO DE BASES E INTEROPERABILIDADE

Uma das principais fragilidades operacionais identificadas tanto na análise documental quanto no *survey* é a ausência de interoperabilidade entre as bases de dados relevantes para a gestão



do fogo: BDQueimadas, PRODES, CAR, SIGEF (Sistema de Gestão Fundiária), SISBOV, DATASUS/SIH-SUS, SINESP (Sistema Nacional de Informações de Segurança Pública, do Ministério da Justiça e Segurança Pública) e os sistemas municipais de saúde. Cada base é gerida por um órgão distinto, com formatos, periodicidades e protocolos de acesso diferentes. A construção de um repositório integrado de dados, ou, na versão mais modesta, mas imediatamente viável, de uma API de interoperabilidade que permita cruzamento em tempo real, é condição necessária tanto para os modelos analíticos propostos neste livro quanto para o próprio funcionamento do EUDR na sua dimensão investigativa.

Os instrumentos jurídicos, nacionais e internacionais, são tão eficazes quanto a evidência técnica que os sustenta. Uma lei que prevê responsabilização pelo uso ilegal do fogo só produz punição efetiva se houver como identificar quem iniciou o incêndio, em qual polígono, em que data, e se houver como demonstrar o nexo causal entre aquela queimada e os danos sanitários sofridos pela população local. Essas questões de prova são precisamente onde as tecnologias de monitoramento, rastreabilidade e análise de dados entram como instrumentos centrais de governança, não como acessórios técnicos.

No contexto da criminalidade ambiental organizada na indústria madeireira, a rastreabilidade territorial e produtiva é o mecanismo central de combate a ilícitos ambientais: sem ela, é impossível distinguir produto legal de produto ilegal nas cadeias de valor (Martins; Perazzoni; Janducci, 2024). A mesma lógica se aplica às queimadas: sem georreferenciamento preciso dos focos, sem integração entre registros fundiários e dados de incêndio, e sem sistemas capazes de identificar quem é o proprietário do imóvel onde o fogo começou, a responsabilização civil e penal é estruturalmente inviável.

Além do sensoriamento remoto por satélite e da rastreabilidade pecuária já examinados, duas outras tecnologias têm grande potencial de transformação nesse contexto. A tecnologia *blockchain*,



em suas aplicações de registro distribuído e imutável, oferece a possibilidade de criar um histórico territorial verificável que não pode ser retroativamente adulterado, o que tem especial relevância para fins de prova jurídica (Perazzoni *et al.*, 2025c, 2025d). E os sistemas de integração de bases de dados, que cruzam informações de diferentes fontes públicas, registros fundiários, dados de monitoramento ambiental, registros veterinários e dados de saúde, tornam possível a análise de padrões que nenhuma fonte isolada revelaria.

Um exemplo concreto de como essa integração funciona na prática: o estudo de caso com a comunidade Paiter Suruí, liderado pelo cacique Anderson Suruí, mostra como tecnologias *Web3* e registros *blockchain* foram utilizados por um povo indígena para criar um inventário territorial de sua floresta que serve simultaneamente como instrumento de proteção territorial, de comprovação de integridade ambiental para fins de acesso a mercados de carbono, e de evidência jurídica contra invasores (Perazzoni *et al*., 2025d). É uma aplicação concreta e exitosa de tecnologia como instrumento de direitos humanos, conduzida pelo próprio grupo em situação de vulnerabilidade.

A limitação central dessas tecnologias é que seu potencial é muito maior do que seu uso efetivo atual. O questionário desta pesquisa revelou que a maioria dos respondentes, em todos os grupos, não dispõe de acesso sistemático a tecnologias de predição, monitoramento ou rastreabilidade no seu trabalho cotidiano. Há, portanto, um déficit de capacidade tecnológica que não é essencialmente um problema de disponibilidade da tecnologia, mas de acesso, formação e integração institucional.

As consequências dessa fragmentação ultrapassam a esfera operacional. Elas afetam a capacidade de produzir evidências, antecipar riscos e coordenar respostas institucionais. Os modelos apresentados nas seções seguintes e o protótipo descrito ao final deste capítulo surgem precisamente como tentativas de enfrentar esse problema.



3.4 RESPOSTAS INVESTIGATIVAS: O MODELO REML/BLUP PARA BRIGADISTAS E POLÍCIA

Os capítulos anteriores estabeleceram associações entre queimadas e desfechos de saúde que, por sua consistência e magnitude, sugerem fortemente uma relação causal, mas não a demonstram com o rigor necessário para embasar responsabilização jurídica. Avançar dessa evidência para a ação exige instrumentos capazes de apoiar a investigação no terreno. O questionário desta pesquisa tornou esse gargalo concreto: brigadistas e agentes de fiscalização relataram falta de meios e de dados para preparar a resposta e identificar autores. É a essa necessidade que responde o modelo REML/BLUP apresentado nesta seção, concebido para detectar anomalias nos padrões de focos de incêndio e apoiar a investigação criminal. Trata-se, registre-se, de um modelo proposto, em desenvolvimento, e não de resultados consolidados.

3.4.1 MODELO REML/BLUP: DETECÇÃO DE ANOMALIAS E APOIO À INVESTIGAÇÃO CRIMINAL

A lógica do modelo REML/BLUP pode ser explicada sem qualquer referência estatística: trata-se de aprender como o fogo se comporta normalmente em um determinado território, dada a temperatura, a umidade, a vegetação, o histórico de queimadas, e identificar quando o que se observa é significativamente diferente do esperado. Quando um conjunto de focos ocorre em uma região, em uma época e em um contexto em que o fogo não seria esperado por razões climáticas e ambientais, isso constitui sinal analítico de anomalia. Não é prova de crime. É um alerta que justifica investigação prioritária.

Para brigadistas e agentes de fiscalização, a utilidade prática é direta: em vez de distribuir recursos uniformemente por uma



área vasta, o modelo permite identificar os polígonos onde o fogo observado diverge mais do padrão esperado e, a partir do padrão climático previsto, antecipar as regiões com maior probabilidade de incêndio nos meses seguintes, concentrando os esforços de prevenção onde são mais necessários. Para agentes da Polícia Federal e do Ministério Público, a mesma divergência estatística, documentada e referenciada geograficamente, fundamenta a abertura de procedimentos investigativos: incêndios que não podem ser explicados por fatores climáticos e ambientais constituem evidência inicial de causa antrópica deliberada, um passo importante na cadeia de prova do incêndio criminoso.

O modelo REML/BLUP não substitui a investigação humana nem produz prova autônoma. A sua contribuição é de inteligência analítica: organizar o território de forma a que os investigadores saibam onde olhar primeiro. O produto final não é uma equação; é um mapa de priorização de fiscalização e investigação, atualizável automaticamente à medida que chegam novos dados do INPE. Desenvolvido em parceria com peritos da Polícia Federal, o modelo está documentado em Sponchiado *et al.* (2025), trabalho apresentado no XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias (COBREAP).

Formalmente, o modelo utiliza a metodologia REML/BLUP (*Restricted Maximum Likelihood / Best Linear Unbiased Prediction*), originalmente desenvolvida para a análise de dados genéticos em melhoramento de plantas (Resende, 2007; Piepho *et al.*, 2008), mas aplicável a qualquer contexto em que se queira separar efeitos fixos, como as variáveis climáticas que afetam sistematicamente uma região, de efeitos aleatórios, como as características específicas de cada localidade que não são captadas pelas variáveis observadas. No contexto dos incêndios, isso permite identificar anomalias: regiões onde ocorrem mais incêndios do que o modelo climático e ambiental esperaria, o que constitui evidência de atividade humana deliberada. A formulação matemática do modelo, o estimador e a implementação computacional constam do Apêndice C.



3.5 RESPOSTAS SANITÁRIAS: ESTIMAÇÃO DA CARGA SANITÁRIA PARA GESTORES DE SAÚDE E RESPONSABILIZAÇÃO LEGAL

3.5.1 O MODELO DE PAINEL COM EFEITOS FIXOS: DA CORRELAÇÃO À CARGA SANITÁRIA ESTIMADA

O modelo de painel com efeitos fixos responde a uma pergunta diferente da do REML/BLUP: não "este fogo é suspeito?", mas "quanto este fogo custa à saúde pública?". A lógica intuitiva é a de comparar cada município com o seu próprio histórico: nos meses em que as queimadas foram mais intensas, houve mais internações do que o esperado para aquele município? E com quanto tempo de atraso chegaram essas internações?

Para gestores de saúde pública, a resposta a essa pergunta tem implicação direta: se a análise indica que, nos meses seguintes a um pico de queimadas, as internações cardiovasculares e os atendimentos oculares aumentam em uma região, sobretudo na Amazônia, é possível pré-posicionar recursos, equipes, medicamentos e leitos, antes que o pico de demanda chegue. O alerta do INPE sobre focos intensos em agosto e setembro pode ser convertido em um alerta sanitário para os meses imediatamente seguintes. Esse valor preditivo é independente de qualquer estimativa de causalidade definitiva.

Para o sistema de justiça, a estimativa de carga sanitária atribuível às queimadas, o número de internações e o custo financeiro que provavelmente não teriam ocorrido na ausência do fogo, fornecem base técnica para ações de responsabilização civil fundadas no princípio do poluidor-pagador. A cadeia argumental é: identifica-se o foco (INPE), estima-se o aumento de internações associado (modelo



de painel), quantifica-se o custo (SIH-SUS), e demonstra-se que o responsável pelo fogo ilegal gerou externalizações sanitárias com valor econômico mensurável. O modelo em calibração busca tornar essa cadeia quantitativamente defensável em sede judicial.

Esse gargalo também emergiu do questionário: a cegueira institucional recíproca revelou que os gestores raramente dimensionam o impacto sanitário do fogo, carecendo de uma estimativa de custo que hoje não existe. O painel municipal estimado nesta pesquisa (seção 2.4.2) é a prova de conceito de que esse impacto é mensurável: estabeleceu, com robustez, o efeito agudo do PM2.5 sobre as internações cardiovasculares. O passo seguinte, proposto como desenvolvimento futuro, é um painel mais completo, voltado a estimar, por município, os *lags* ótimos e o custo atribuível, de modo a antecipar quanto o sistema precisará gastar quando as queimadas aumentam. Trata-se de modelo proposto, cuja especificação formal consta do Apêndice C e cuja versão preliminar foi apresentada no 24º Encontro Trienal da *International Association of Forensic Sciences* (IAFS 2026), em Sofia (Perazzoni *et al.*, 2026); a sua maturação exige dados de maior granularidade do que os atualmente disponíveis.

Formalmente, o modelo utiliza um *design* de painel com efeitos fixos, uma das estratégias mais rigorosas disponíveis em econometria para inferir causalidade sem a necessidade de um experimento controlado. Em vez de comparar municípios diferentes entre si, ele compara cada município com ele mesmo ao longo do tempo. Isso elimina automaticamente qualquer viés causado por características permanentes dos municípios, como a qualidade histórica do sistema de saúde, a proximidade de centros urbanos ou o perfil epidemiológico basal, que poderiam fazer parecer que municípios com piores condições de saúde têm mais doenças por causa das queimadas quando, na verdade, simplesmente partem de condições piores. Ao comparar cada município com o seu próprio passado, o modelo isola o efeito das variações temporais das queimadas sobre as variações temporais dos desfechos de saúde.



A formalização matemática do modelo, com a especificação completa das variáveis, a estrutura de defasagens temporais, o estimador e o procedimento de calibração, encontra-se no Apêndice C. Para os fins deste capítulo, o que importa é o que o modelo permite saber e, sobretudo, como o que aprende pode ser utilizado pelos diferentes destinatários institucionais.

Em sua versão madura, o resultado prático do modelo será uma estimativa, por município, de quanto de cada internação ou atendimento pode ser atribuído às queimadas e do custo correspondente, controlando os demais fatores identificáveis. É essa estimativa que fornece a base técnica auditável para os dois usos já descritos: o planejamento antecipado de recursos hospitalares pelos gestores de saúde e a quantificação do dano sanitário economicamente mensurável que sustenta, na perícia forense ambiental, a aplicação do princípio do poluidor-pagador em ações de responsabilização civil.

3.6 PERSPECTIVAS FUTURAS: O PROTÓTIPO *TATATINGA*

A fragmentação da informação examinada na seção anterior não é apenas um obstáculo operacional: foi também o problema que a própria realização desta pesquisa tornou mais tangível, pois reunir e cruzar dados ambientais, sanitários, territoriais e socioeconômicos de origens tão distintas mostrou que a maior dificuldade não está na falta de dados, mas na sua dispersão. Os resultados aqui obtidos estabelecem associações, e não relações de causa e efeito, e há limites claros ao que foi possível examinar, inclusive a articulação, apenas tangenciada, entre a expansão da pecuária, a grilagem e a violência fundiária. É razoável supor, porém, que, se esses dados estivessem reunidos e acessíveis a mais investigadores e instituições,



seria possível avançar consideravelmente na compreensão das relações entre a fumaça e a saúde humana.

Foi dessa percepção que nasceu a ideia do *Tatatinga*. O nome deriva do tupi-guarani: "tata" (fogo, fumaça) e "tinga" (branca), uma referência direta à fumaça branca que se espalha sobre a Amazônia durante os meses de seca, atingindo de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis, dentre elas os povos indígenas, como ficou demonstrado ao longo deste livro. A motivação inicial do protótipo foi de ordem prática: trabalhos acadêmicos desta complexidade, com tantos dados e cruzamentos, raramente são lidos em sua integralidade, e os dados neles contidos tendem a se perder. Ao reunir os resultados em um painel interativo e bilíngue (português e inglês), disponível *online*, o sistema amplia significativamente o alcance dos achados da pesquisa, permitindo que qualquer pessoa, pesquisador, gestor ou cidadão, acesse e explore os indicadores de forma intuitiva.

Concebido a partir dos resultados desta investigação, o protótipo encontra-se disponibilizado online em https://tatatinga.kenkwo.workers.dev/ e reúne os painéis descritos nesta seção, com as limitações nela discutidas.

Convém distinguir, com honestidade, o que o protótipo já realiza daquilo que projeta. Em sua versão atual (v1.0, 2025), o *Tatatinga* trabalha basicamente com os dados obtidos ao longo da pesquisa, referentes ao período de 2019 a 2024, integrando focos de incêndio, área queimada, qualidade do ar, internações, infraestrutura de saúde e indicadores territoriais. O sistema foi construído exclusivamente com ferramentas gratuitas e sem qualquer recurso financeiro externo, o que impõe limitações claras ao seu grau de sofisticação. Ainda assim, o protótipo demonstra o potencial de uma plataforma que, se plenamente implantada e integrada via API com as plataformas já existentes (DATASUS, MapBiomas, INPE, entre outras), poderia operar em tempo real ou quase real, superando o gargalo atual que é a desconexão entre dados ambientais, dados de pecuária, dados de saúde e dados sociais. Quando essa integração se concretizar,

a capacidade de gerar *insights* e de compreender as relações entre o fogo e seus impactos será substancialmente ampliada.

O painel Panorama (Figura 40) oferece um resumo imediato da crise, evidenciando que, no período analisado, registraram-se mais de 4,4 milhões de atendimentos e internações por doenças vinculadas a queimadas, resultando em 13.300 óbitos hospitalares e um custo total ao SUS estimado em R$ 1,5 bilhão. Destaca-se o ano de 2023 como o mais crítico, com um pico de 115.242 focos de incêndio, 68.930 internações respiratórias e R$ 312 milhões em custos hospitalares. A interface apresenta ainda a comparação entre a Amazônia Legal e a média nacional em indicadores como leitos de UTI por 10.000 habitantes (2,14 contra 3,12), distância média ao atendimento (24 km contra 14,5 km) e intensidade de focos (67 vezes superior à média das demais regiões). Os dados de leitos provêm do Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES), registro oficial da rede assistencial mantido pelo Ministério da Saúde (Ministério da Saúde, 2024a), e os denominadores populacionais, das Estimativas de População Residente do IBGE (IBGE, 2024b).

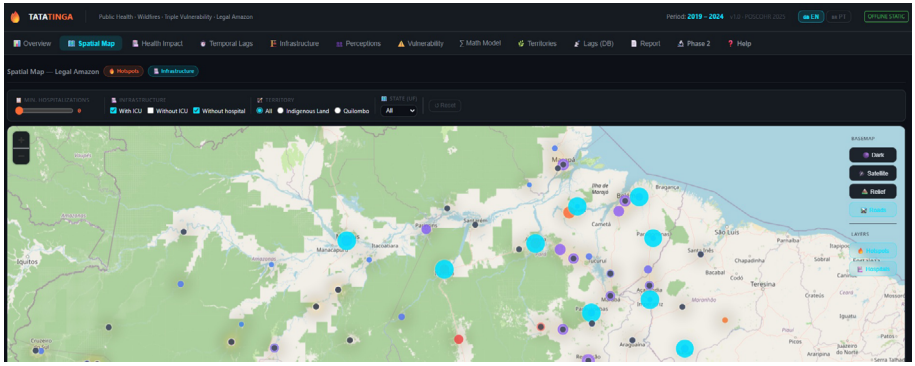
Figura 40 – Painel Panorama do protótipo *Tatatinga*: indicadores-chave do impacto das queimadas sobre a saúde na Amazônia Legal (2019–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

O painel Mapa Espacial (Figura 41) oferece uma leitura geográfica integrada, sobrepondo a intensidade dos focos de incêndio à infraestrutura hospitalar disponível na Amazônia Legal. A ferramenta permite aplicar filtros por tipo de unidade de saúde (com UTI, sem UTI, sem hospital), por território (Terras Indígenas e Quilombos) e por estado, evidenciando visualmente a sobreposição entre elevada exposição ao fogo e fragilidade institucional. O mapa disponibiliza ainda diferentes camadas de base (satélite, relevo, estradas), permitindo contextualizar geograficamente os dados.

Figura 41 – Painel de Mapa Espacial do protótipo *Tatatinga*: leitura geográfica integrada dos focos de incêndio e da infraestrutura hospitalar na Amazônia Legal, com filtros por tipo de unidade e por território

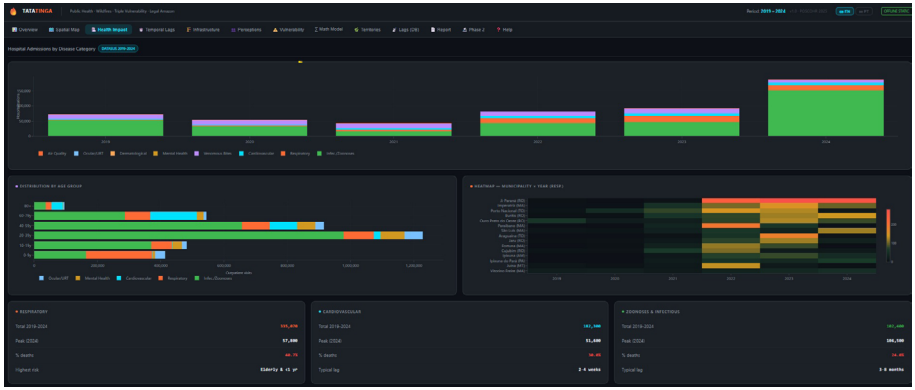


Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

A dimensão sanitária é aprofundada no painel de Impacto na Saúde (Figura 42), que categoriza as internações hospitalares por tipo de doença e por faixa etária. As doenças respiratórias respondem pela maior parcela da carga sanitária (335.070 internações no período, 40,7% dos óbitos), seguidas pelas doenças cardiovasculares (182.300 internações, 30% dos óbitos) e pelas zoonoses e doenças infecciosas (102.400 internações, 24% dos óbitos). O sistema demonstra que as populações mais vulneráveis são os idosos e as

crianças menores de um ano. Um *heatmap* complementar permite identificar os municípios com maior concentração de internações respiratórias ao longo dos anos, destacando-se Altamira (PA), Porto Velho (RO) e Novo Progresso (PA).

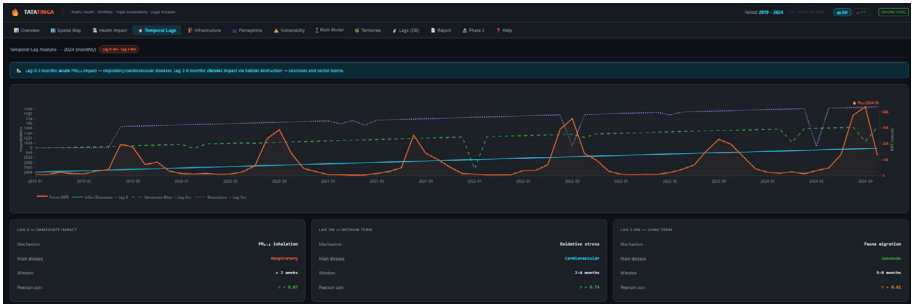
Figura 42 – Painel de Impacto na Saúde do protótipo *Tatatinga*: internações hospitalares por categoria de doença e por faixa etária



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

A complexidade da dinâmica temporal entre o fogo e os desfechos em saúde é explorada no painel de *Lags* Temporais (Figura 43), que estabelece três janelas de impacto com base na análise mensal do ano de 2023: o impacto agudo (*lag* 0, até 2 semanas), caracterizado pela inalação de material particulado fino (PM2,5) e pela eclosão de doenças respiratórias, com correlação de Pearson r = 0,87; o impacto subagudo (*lag* de 3 meses), marcado pelo estresse oxidativo e por eventos cardiovasculares, com r = 0,74; e o impacto crônico (*lag* de 5 a 8 meses), associado à migração da fauna e ao surgimento de zoonoses, com r = 0,61.

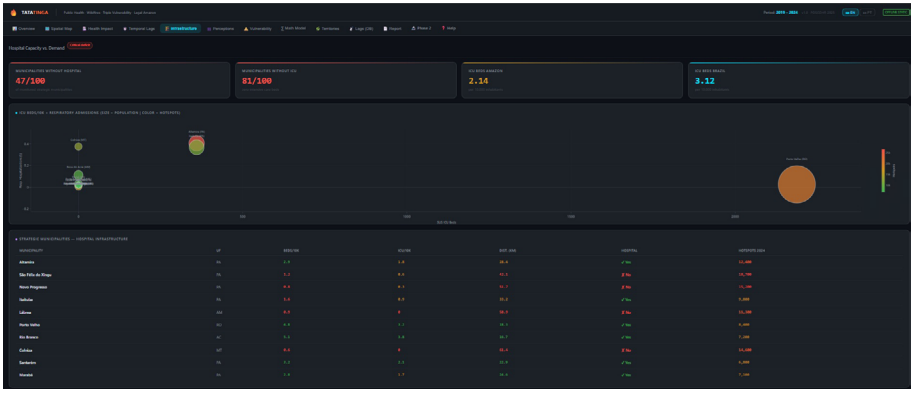
Figura 43 – Painel de Lags Temporais do protótipo *Tatatinga*: análise da defasagem entre os focos de incêndio e os desfechos em saúde



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

O confronto entre a necessidade de atendimento e a capacidade instalada é o foco do painel de Infraestrutura (Figura 44). A análise de 90 municípios estratégicos revela um déficit crítico: 37 não possuem qualquer hospital e 71 não dispõem de leitos de UTI. Um gráfico de bolhas permite visualizar a relação entre leitos de UTI, internações respiratórias, população e intensidade de focos por município, enquanto uma tabela detalhada apresenta as condições hospitalares dos municípios mais expostos, incluindo distância ao atendimento e número de focos em 2023.

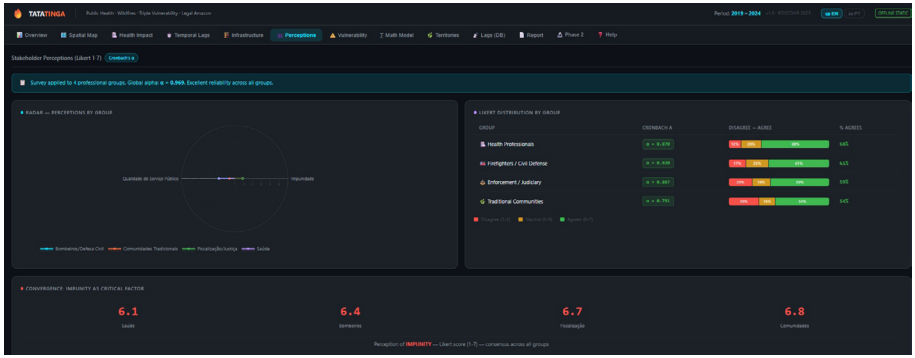
Figura 44 – Painel de Infraestrutura do protótipo *Tatatinga*: confronto entre a capacidade hospitalar e a demanda nos municípios mais expostos ao fogo



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

O painel de Percepções (Figura 45) sistematiza os resultados do *survey* aplicado a quatro grupos profissionais (profissionais de saúde, bombeiros e defesa civil, agentes de fiscalização e do sistema de justiça, e comunidades tradicionais), com confiabilidade estatística excelente (alfa de Cronbach global $\alpha = 0{,}969$). Um gráfico radar permite comparar as percepções dos grupos em seis dimensões (governança, políticas públicas, impunidade, qualidade do serviço, acesso e justiça ambiental), enquanto a análise de convergência revela que a percepção de impunidade é o fator crítico comum a todos os grupos, com pontuações entre 6,1 e 6,8 em uma escala Likert de 1 a 7.

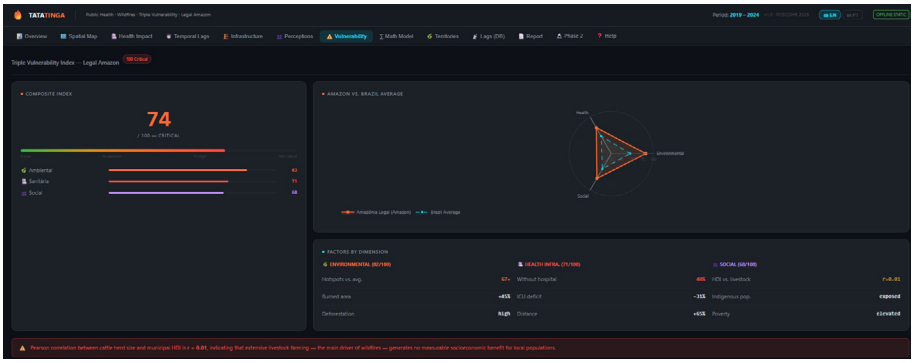
Figura 45 – Painel de Percepções do protótipo *Tatatinga*



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

A convergência das crises ambiental, sanitária e social é sintetizada no painel de Vulnerabilidade (Figura 46), que apresenta o Índice de Tripla Vulnerabilidade. A Amazônia Legal atinge uma pontuação composta de 74/100, classificada como crítica, com a dimensão ambiental em 82, a sanitária em 71 e a social em 68. Um achado fundamental destacado pelo sistema é a quase nula correlação ($r = 0{,}01$) entre o rebanho bovino e o IDH municipal, indicando que a pecuária extensiva, principal vetora das queimadas, não se traduz em benefício socioeconômico mensurável para as populações locais.

Figura 46 – Painel de Vulnerabilidade do protótipo *Tatatinga*: Índice de Tripla Vulnerabilidade (Ambiental, Sanitária e Social) da Amazônia Legal



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

O painel de Territórios (Figura 47) denuncia que, entre 2019 e 2024, ocorreram 99.923 focos de incêndio ilegais no interior de 608 Terras Indígenas e territórios quilombolas, com um pico alarmante de 29.899 focos em 2024. A distribuição por bioma revela que o Cerrado concentra 49,7% dos focos e a Amazônia 46,5%. Um gráfico de dispersão complementar cruza os focos de incêndio com as internações no SUS por município, com o tamanho dos círculos representando a distância ao hospital mais próximo, permitindo identificar os territórios onde a violação ambiental coincide com a maior vulnerabilidade sanitária.



Figura 47 – Painel de Territórios do protótipo *Tatatinga*: focos de incêndio ilegais em Terras Indígenas e Quilombolas (2019–2024)



Fonte: elaboração própria, a partir do protótipo Tatatinga.

A camada analítica mais avançada do sistema, apresentada no módulo Modelo Matemático, formaliza a relação entre o fogo e os desfechos em saúde por meio de equações estruturais com efeitos fixos de município e de tempo, estimadores *Within* (FE), modelos de defasagem distribuída polinomial (PDL) e um problema de otimização (Lagrangeano) para a alocação ótima de recursos de saúde. Essa formalização, cuja integração plena ao sistema ainda depende de dados em tempo real e de recursos computacionais atualmente indisponíveis, permanece como agenda para desenvolvimentos futuros.

Por fim, o módulo Relatório gera um sumário executivo exportável, ancorado no paradigma *One Health* (Saúde Única), articulando a cadeia causal completa: da pecuária extensiva ao desmatamento e ao fogo, do fogo à inalação de PM2,5 e à proliferação de zoonoses, e destes aos desfechos em saúde. As recomendações de política pública geradas pelo sistema incluem a expansão de leitos de UTI em municípios com menos de 1 leito por 10.000 habitantes,



a implementação de telemedicina para mitigar as distâncias amazônicas, o fortalecimento do IBAMA e das brigadas de combate, e a efetiva criminalização do uso ilegal do fogo.

Importa situar com honestidade o estatuto da iniciativa. O *Tatatinga* não é um produto concluído nem um sistema em uso institucional, mas um protótipo e uma prova de conceito. Desenvolvido sem recurso financeiro, pelo próprio autor e colaboradores, utilizando exclusivamente ferramentas gratuitas, ele não pretende substituir as plataformas existentes, mas demonstrar que é possível integrá-las. A proposta é que, futuramente, o sistema seja desenvolvido de forma plena, conectado via API às bases do DATASUS, MapBiomas, INPE e FUNAI, operando em tempo real e ampliando a capacidade de monitoramento, prevenção e responsabilização.

Cabe registrar que o autor não provém da área de saúde, mas transita entre os campos jurídico, ambiental e tecnológico. Este pós-doutoramento representou o primeiro contato efetivo com a saúde pública como objeto de estudo, o que exigiu a assimilação de modelos, métodos e linguagens próprios dessa área. É justamente essa posição interdisciplinar que justifica a proposta do *Tatatinga*: trazer a expertise em tecnologia, direito e meio ambiente para integrar dados que, isolados em seus respectivos silos, não revelam a dimensão completa do problema. Para não ficar apenas no campo das críticas e da apresentação do problema, propõe-se aqui um caminho concreto e demonstra-se que ele é viável, mesmo com recursos mínimos. Fica, portanto, como princípio de ideia e como agenda futura: um instrumento que, plenamente desenvolvido, poderá contribuir para que o Estado e a sociedade compreendam e enfrentem, de forma integrada, a crise que asfixia a Amazônia e seus povos.



3.7 SÍNTESE:
RESPOSTAS INSTITUCIONAIS E AGENDA JURÍDICO-FORENSE

Os três capítulos deste livro formam um argumento encadeado. O primeiro demonstrou que os incêndios florestais possuem causas estruturais identificáveis e evitáveis. O segundo evidenciou que seus impactos sobre a saúde são reais, mensuráveis e desproporcionalmente concentrados sobre populações vulneráveis. Este capítulo examinou os instrumentos disponíveis para enfrentar esse problema nas dimensões jurídica, institucional, tecnológica e pericial.

O desafio central identificado ao longo deste capítulo não é a ausência de instrumentos jurídicos, tecnológicos ou periciais. Esses instrumentos já existem em medida significativa. O problema reside na dificuldade de articulá-los de forma coordenada, transformando informação em evidência, evidência em responsabilização e responsabilização em prevenção. Trata-se, nesse sentido, de um desafio menos tecnológico do que institucional. A percepção de impunidade identificada entre as comunidades afetadas e os agentes de fiscalização aponta para esse mesmo desafio: o de transformar capacidades formais em resultados concretos de prevenção, dissuasão e reparação.

Nesse contexto, os instrumentos analisados devem ser compreendidos como complementares. O fortalecimento da Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo, os mecanismos internacionais de rastreabilidade, as tecnologias de monitoramento e os modelos forenses apresentados nesta pesquisa contribuem para ampliar a capacidade estatal de identificar riscos, produzir evidências e orientar decisões. Nenhum deles é suficiente isoladamente, mas sua articulação amplia significativamente o potencial de resposta institucional.



A perspectiva dos direitos humanos confere direção normativa a esse esforço. O objetivo não é apenas aperfeiçoar a gestão ambiental, mas reduzir a exposição de populações vulneráveis a riscos previsíveis e recorrentes, assegurando a proteção do direito à saúde, do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e dos direitos territoriais das comunidades mais afetadas.

As perspectivas discutidas na seção anterior ilustram como essa articulação pode ser traduzida em instrumentos concretos de apoio à decisão. O protótipo *Tatatinga*, apresentado na seção 3.6, é a demonstração dessa abordagem integrada: ainda em fase de desenvolvimento e validação, mostra como dados hoje dispersos podem convergir em um único ambiente de apoio à prevenção, ao monitoramento e à responsabilização. É nesse contexto que se inserem as contribuições metodológicas e aplicadas desta pesquisa. Mais do que propor respostas isoladas, o trabalho procurou demonstrar a necessidade de abordagens integradas que articulem ciência, tecnologia, saúde pública e direito para enfrentar os impactos dos incêndios florestais sobre populações e territórios vulneráveis.



CONCLUSÃO

Este livro partiu de uma pergunta aparentemente simples: o que os incêndios florestais estão fazendo com a saúde das pessoas que vivem onde o fogo queima? Respondê-la exigiu percorrer as causas do fogo, seus efeitos sanitários e os limites das respostas institucionais. Os três capítulos construíram, assim, três achados encadeados — empírico, sanitário e jurídico — que, considerados em conjunto, permitem compreender o fenômeno para além de sua dimensão ambiental. São padrões convergentes, e não demonstração causal exaustiva: as páginas seguintes articulam esses achados, delimitam o que os dados efetivamente permitem afirmar, identificam o que permanece em aberto e propõem implicações práticas para a política pública, para o direito e para a agenda de investigação.

ACHADO EMPÍRICO:
AS CAUSAS SÃO CONHECIDAS E EVITÁVEIS

O primeiro achado, de natureza empírica, é que os incêndios florestais no Brasil não são fenômenos naturais inevitáveis. São o produto de escolhas econômicas, políticas e institucionais identificáveis. A pecuária extensiva opera como a primeira linha de ação da grilagem na Amazônia porque o custo privado é baixo, o controle do território é rápido e a impunidade é estrutural: desmata-se, queima-se, coloca-se o boi e estabelece-se posse. O benefício é privado; o custo, sanitário e ambiental, é socializado.

A pesquisa identificou essa lógica com evidência empírica: as classes de área dos focos indicam que cerca de 76% das



ocorrências no Brasil e 86% na Amazônia Legal incidem sobre áreas de desmatamento recente ou consolidado, e não sobre vegetação nativa; e as correlações de Pearson entre pecuária, desmatamento e queimadas na Amazônia Legal situam-se entre 0,44 e 0,65 ($p < 0,05$; $n = 772$ municípios). Aragão (2008) nomeia o mecanismo com precisão no plano doutrinário: há uma infeliz coincidência entre a ocorrência geográfica dos riscos e a ocupação do solo por populações vulneráveis, e essa coincidência não é, no contexto amazônico, acidente topográfico; é resultado histórico de políticas que expandiram a fronteira agropecuária sobre os territórios habitados por quem tem menor capital político e menor acesso a serviços.

A pesquisa identificou também o fracasso histórico da resposta estatal em reverter esses incentivos: a percepção de responsabilização efetiva dos incendiários, captada pelo questionário, foi de descrença quase unânime entre os grupos consultados. Quando os próprios agentes de fiscalização acreditam que a punição raramente ocorre, o efeito dissuasório da lei é anulado na prática, independentemente de sua severidade formal. Figueira (2004) documenta esse fenômeno como crime endógeno ao Estado: situações em que a promiscuidade entre autoridades e práticas ilegais torna a norma proibitiva estruturalmente incapaz de produzir responsabilização efetiva.

A Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo representa uma inflexão normativa relevante. Os dados de 2025, com queda de 61% nos focos entre janeiro e outubro em relação ao mesmo período de 2024, sugerem que a combinação de políticas preventivas com condições climáticas favoráveis pode produzir resultados concretos. O risco de regressão permanece enquanto a capacidade de responsabilização efetiva não for consolidada: sem consequência real para quem inicia o fogo ilegalmente, qualquer melhora climática temporária pode ser seguida de novo pico nas primeiras secas severas.



ACHADO SANITÁRIO:
OS IMPACTOS SÃO MENSURÁVEIS, ESTRUTURADOS NO TEMPO E PROFUNDAMENTE DESIGUAIS

O segundo achado, de natureza sanitária, é que os danos à saúde produzidos pelas queimadas são reais, quantificáveis e distribuídos de forma sistematicamente injusta. A análise municipal com efeitos fixos, controlando sazonalidade e clima, identificou um impacto agudo robusto da poluição por fumaça sobre as internações cardiovasculares, efeito substancialmente amplificado na Amazônia Legal (cerca de +25% por desvio-padrão de PM2.5) frente à média nacional (cerca de +11%), magnitude convergente com a literatura epidemiológica de referência, e um impacto sobre os agravos oculares, associados aos focos. A sazonalidade desses agravos concentra-se no mês de maior atividade de queimadas, sobretudo na Amazônia, onde o pico cardiovascular se desloca para setembro, acompanhando o fogo. Esse gradiente regional, maior dano exatamente onde as populações são mais vulneráveis, é a expressão empírica da injustiça distributiva que percorre este trabalho.

A dimensão financeira articula um dado factual e uma estimativa exploratória. O dado factual: entre 2019 e 2024, o sistema público de saúde gastou R$ 30,89 bilhões em internações por doenças cardiovasculares e respiratórias, as categorias com maior plausibilidade de associação com a exposição ao fogo (SIH-SUS). A estimativa exploratória: um exercício contrafactual construído sobre o painel municipal (que, para cada município, mês e categoria, compara as internações observadas com as esperadas em um cenário de menor exposição (percentil 25), com teto conservador de 10%) situa a fração atribuível ao fogo na ordem de R$ 1,5 bilhão no período, cerca de 5% do total. Os coeficientes da literatura (Requia *et al.*, 2021, que reportam aumentos de 23% nas internações respiratórias



e 21% nas cardiovasculares em populações expostas, chegando a 38% e 27% na Região Norte) não foram convertidos em custo, mas conferem plausibilidade externa a essa ordem de grandeza, reforçada pela convergência do efeito cardiovascular estimado pelo painel na Amazônia com a magnitude ali relatada. Esse valor deve ser lido como ordem de grandeza, sujeita às limitações metodológicas reconhecidas no Capítulo 2, e não como cálculo definitivo. Trata-se, ademais, de uma estimativa conservadora e parcial, um piso, pois cobre apenas a internação hospitalar nas categorias cardiorrespiratórias, deixando de fora o atendimento ambulatorial, a mortalidade e os custos indiretos; o custo social total do fogo é seguramente maior, e quantificá-lo com precisão é justamente o que o painel municipal maduro, com dados de maior granularidade, se propõe a fazer. A análise reforça ainda uma implicação direta para a gestão: sistemas de alerta centrados apenas no PM2.5 lido de forma bruta podem perder o sinal mais informativo na Amazônia, onde os focos e a área queimada se mostram *proxies* mais adequados da exposição (seção 2.3). A trajetória crescente dos gastos, de R$ 4,4 bilhões em 2019 para R$ 7,1 bilhões em 2024, é coerente com o agravamento das queimadas no período, embora não constitua, por si só, prova de causalidade.

Esses custos recaem desproporcionalmente sobre as populações com menor capacidade de se proteger: a condição de tríplice vulnerabilidade da Amazônia Legal, maior exposição ambiental, menor infraestrutura sanitária e maior isolamento social, amplifica sistematicamente os efeitos do fogo sobre quem menos contribuiu para produzi-lo. Cada eixo é documentado com dados objetivos: 40% da população amazônica sem leitos hospitalares no próprio município, distâncias ao hospital 65% superiores à média nacional, IDH consistentemente abaixo da média brasileira. Sob a perspectiva do Comentário Geral n.º 14 do Comitê DESC, interpretado por Moreira e Gomes (2013), manter infraestrutura sanitária insuficiente nas regiões de maior risco ambiental configura padrão equiparável



ao que o direito internacional dos direitos humanos designa como discriminação indireta na fruição do direito à saúde.

O agravamento indígena dentro dessa tríplice vulnerabilidade ganhou, na presente pesquisa, evidência empírica adicional: a análise da série histórica do Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígena (SIASI/SESAI/MS) para 2020–2025 documenta que, enquanto o volume agregado de atendimentos prestados pela SESAI no conjunto das Terras Indígenas do país cresceu cerca de 33% no período, refletindo esforço institucional concreto de reconstrução da saúde indígena, os atendimentos nas duas Terras Indígenas mais atingidas pelos focos de incêndio identificadas no Capítulo 1 caíram significativamente no mesmo período (Kayapó −21%, Parque do Araguaia −30%). O desacoplamento entre o esforço agregado e a oferta efetiva nos territórios mais queimados sugere que a vontade política de proteger populações indígenas, ainda quando materializada em recursos, encontra limites operacionais concretos quando o fogo intenso compromete o acesso. O fogo, para além dos seus efeitos sanitários diretos sobre quem o respira, opera como vetor de degradação do direito à saúde por uma via complementar: a destruição da capacidade operacional do próprio sistema de saúde de chegar a quem mais necessita dele.

ACHADO JURÍDICO:
A DESIGUALDADE DOS DANOS É UM PROBLEMA DE DIREITOS HUMANOS

O terceiro achado, de natureza jurídica, é que a distribuição sistematicamente desigual dos riscos e dos danos documentada nos dois achados anteriores não é um acidente, mas uma injustiça ambiental que, à luz do direito à saúde consagrado no Comentário



Geral n.º 14 do Comitê DESC, configura uma falha do Estado em cumprir suas obrigações decorrentes desse direito (seção 1.4). Essa falha tem expressão concreta na fragmentação das respostas: há instrumentos disponíveis em todas as dimensões analisadas, mas nenhum deles, isoladamente, é suficiente, e a sua articulação permanece incipiente. A PNMIF e as ações da Advocacia-Geral da União representam avanços normativos relevantes. O Regulamento Europeu sobre Produtos Livres de Desmatamento (EUDR) gera incentivos econômicos que a legislação nacional sozinha não consegue criar. As tecnologias de sensoriamento remoto, rastreabilidade produtiva e análise de dados aumentam substancialmente a capacidade de produzir evidências para a responsabilização. Os dois modelos forenses desenvolvidos nesta pesquisa, o REML/BLUP para predição de focos e o painel com efeitos fixos para estimação causal, oferecem ferramentas para transformar dados públicos em evidência juridicamente defensável.

O questionário aplicado qualifica essa fragmentação com dois achados estruturais. O primeiro é uma assimetria sistemática de percepção sobre os impactos sanitários: profissionais de saúde e comunidades tradicionais, que vivem as consequências, reconhecem claramente os efeitos do fogo sobre a saúde (61% e 60%, respectivamente). Brigadistas e agentes de fiscalização tendem a subestimá-los significativamente (24% e 17%). Isso significa que os atores com maior capacidade operacional de pré-posicionar recursos sanitários não percebem a magnitude do problema que deveriam antecipar. O alerta chega tarde não apenas por falta de infraestrutura, mas por falta de percepção partilhada do risco. O segundo achado é um viés de autoavaliação que só se torna visível cruzando as percepções: cada grupo de servidores tende a avaliar positivamente o próprio desempenho, mas criticamente os outros. Brigadistas acham que combatem bem; agentes de fiscalização acham que autuam bem; profissionais de saúde atendem dentro dos recursos disponíveis. Essa cegueira institucional recíproca explica, com mais precisão do



que qualquer diagnóstico normativo, por que as respostas permanecem fragmentadas: nenhum ator, a partir de dentro da sua própria instituição, vê o sistema como um todo. Cada um percebe que faz a sua parte. O que ninguém percebe, de dentro, é onde estão os vazios entre as partes, e é precisamente nesses vazios que vivem as populações mais vulneráveis.

O denominador comum de todas as insuficiências identificadas é a distância entre a norma formalmente robusta e a capacidade operacional de implementá-la. Essa distância não se fecha com mais legislação: fecha-se com infraestrutura de dados, formação técnica das burocracias, recursos adequados para fiscalização e vontade política de tratar o impacto sanitário das queimadas como o problema de saúde pública que os dados mostram que ele é. Na formulação de Aragão (2008), o princípio da precaução é um princípio de justiça em sentido clássico, que protege sobretudo a parte mais frágil e responsabiliza quem tem o poder e o dever de controlar os riscos. É esse equilíbrio que as respostas existentes ainda não conseguiram estabelecer.

O QUE OS DADOS PERMITEM CONCLUIR E O QUE PERMANECE EM ABERTO

Considerados em conjunto, e respeitadas as limitações metodológicas reconhecidas ao longo do texto, os achados desta pesquisa convergem para os seguintes padrões: que há associação consistente entre queimadas e desfechos de saúde em múltiplas categorias diagnósticas; que essa associação é temporalmente estruturada de forma diferente nas duas regiões do país; que, para o rastreio na Amazônia, os focos do INPE e a área queimada superam o PM2.5 lido de forma bruta, ressalva que o painel municipal supera



para a via cardiovascular (seção 2.3); que a infraestrutura hospitalar é insuficiente nos municípios com maior exposição ao fogo; que as populações mais expostas são as que menos confiam nas respostas institucionais; que os gastos do SUS em categorias cardiorrespiratórias atingiram R$ 30,89 bilhões no período, com tendência de crescimento alinhada à intensificação das queimadas; e que mesmo o esforço institucional de reconstrução da saúde indígena pós-2023, com aumento agregado de cerca de 33% nos atendimentos prestados pela SESAI no conjunto das Terras Indígenas, não impediu o colapso de oferta nas Terras Indígenas mais expostas ao fogo, sugerindo que a proteção do direito à saúde indígena exige enfrentar o fogo na origem, e não apenas reforçar a resposta sanitária *post hoc*.

O que esta pesquisa não permite afirmar com a precisão necessária, e que constitui a agenda de investigação mais urgente, é a relação causal quantificada entre exposição ao fogo e desfechos de saúde. O modelo de painel municipal com efeitos fixos, estimado nesta pesquisa, avançou nessa direção ao isolar um efeito robusto para as internações cardiovasculares associadas ao PM2.5; a sua generalização às demais categorias e a desfechos medidos com maior precisão de exposição permanece como agenda. A eficácia comparativa das diferentes intervenções de política pública é outra lacuna que requer estudos com *design* quase-experimental. A magnitude exata da fração dos gastos do SUS atribuível especificamente às queimadas depende de desenhos causais adicionais. Esses desenvolvimentos não são acessórios ao diagnóstico: nascem dele e do que os próprios atores relataram no questionário. Do gargalo investigativo apontado por brigadistas e fiscais deriva o modelo REML/BLUP; da ausência de dimensionamento do custo sanitário, relatada pelos gestores, deriva o painel preditivo; e a plataforma *Tatatinga* é a via para entregar ambos, de forma acessível, a quem vive no interior do problema. Todos permanecem como propostas em desenvolvimento, tendo no painel municipal aqui estimado a sua prova de conceito.



IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

Três implicações práticas decorrem diretamente desta pesquisa. Para os gestores de saúde pública: integrar os dados de focos do INPE, disponíveis diariamente e gratuitamente, aos sistemas de vigilância epidemiológica municipais e estaduais, usando o calendário sanitário documentado aqui para antecipar picos de demanda hospitalar antes que ocorram. Quando os focos são intensos em agosto e setembro, as internações cardiovasculares e os atendimentos oculares tendem a aumentar nos meses seguintes, sobretudo na Amazônia. Essa informação pode ser usada para pré-posicionar recursos.

Para os operadores do direito ambiental: os dados reais do SIH-SUS, corroborados pela plausibilidade epidemiológica de Requia *et al.* (2021), fornecem base técnica para ações de responsabilização patrimonial fundadas no princípio do poluidor-pagador. A cadeia que vai da identificação do foco pelo INPE à quantificação do aumento de internações nas categorias relevantes é, com os modelos forenses em desenvolvimento, progressivamente mais defensável como evidência de nexo causal.

Para os formuladores de política pública: a implementação da PNMIF deve ser tratada como prioridade de capacidade administrativa e financiamento, não apenas de reforma normativa. E o investimento na infraestrutura de dados territoriais que o EUDR pressupõe, georreferenciamento de imóveis, integração de bases fundiárias e ambientais, rastreabilidade produtiva, é simultaneamente condição de acesso ao mercado europeu e condição de efetividade do sistema de responsabilização. Cabe registrar, porém, que o próprio EUDR, embora seja um instrumento necessário de responsabilização do poder econômico privado e de proteção transversal do direito à saúde, tem hoje o seu alcance condicionado a uma estabilização normativa que ainda não ocorreu, após sucessivos adiamentos e



medidas de simplificação. Especificamente quanto às populações indígenas mais expostas, a evidência empírica do colapso operacional documentado nestas páginas sugere que a proteção do direito à saúde indígena exige tratar a redução do fogo na origem como prioridade sanitária equivalente à própria expansão da capacidade da SESAI: sem aquela, esta tem alcance estruturalmente limitado precisamente onde mais é necessária.

Cabe registrar, por fim, uma implicação que ultrapassa a escala nacional. A agenda internacional de perdas e danos, construída para lidar com os efeitos das mudanças climáticas que não foram evitados nem pela mitigação nem pela adaptação, vem sendo estendida aos incêndios florestais, e a literatura recente sustenta que o reconhecimento das perdas e danos decorrentes do fogo é condição de justiça climática (Veiga *et al.*, 2025). A isso acresce uma dimensão que a experiência jurídica europeia evidencia: a de que o próprio fogo pode destruir áreas já reabilitadas, convertendo em perda o esforço de reabilitação (Aragão *et al.*, 2026). É esse o tipo de reconhecimento que a estimativa de custo atribuível apresentada no Capítulo 2 permite fundamentar: converter fumaça em internações, e internações em valores, é o passo que transforma um dano difuso em dano contabilizável, e um dano contabilizável em pretensão juridicamente sustentável. Do ponto de vista do direito internacional dos direitos humanos, essa quantificação interessa menos como cifra do que como prova, pois transporta a injustiça documentada neste trabalho do plano da denúncia para o plano da responsabilização.

CONSIDERAÇÃO FINAL

Há uma pergunta que esta pesquisa não consegue responder, e que provavelmente nenhuma investigação individual responde sozinha: por que, diante de tudo o que os dados documentam,



as respostas institucionais permanecem insuficientes? A resposta mais honesta é que a insuficiência não reflete ignorância sobre o problema. Reflete a distribuição do poder político e econômico que, historicamente, favoreceu os interesses da expansão agropecuária sobre os direitos das populações tradicionais e indígenas. As comunidades que mais sofrem com as queimadas são as que têm menos representação política, menos acesso à justiça e menor capacidade de mobilizar em seu favor os mecanismos de proteção que o direito formal, nacional e internacional, coloca à disposição.

Mudar essa equação exige que as ferramentas propostas nesta pesquisa cheguem às mãos das comunidades que vivem no interior do problema, não apenas às das instituições que o gerem à distância. Exige que a evidência produzida pela academia e pela perícia forense se converta em argumentos compreensíveis para lideranças indígenas, para organizações comunitárias e para advogados que litigam em defesa de comunidades ribeirinhas. E exige que o sistema de direitos humanos, nacional e internacional, seja continuamente pressionado a cumprir as obrigações que os instrumentos existentes já estabelecem, sem esperar que a magnitude do dano atinja o limiar da visibilidade política.

A principal contribuição desta pesquisa não reside na pretensão de oferecer respostas definitivas para problema de elevada complexidade, mas em integrar, de forma empiricamente informada e interdisciplinar, dimensões jurídicas, sanitárias, ambientais e institucionais frequentemente tratadas de maneira fragmentada. Ao fazê-lo, a pesquisa oferece diagnóstico qualificado, explicita gargalos concretos e propõe caminhos jurídicos, institucionais e metodológicos promissores para a evolução futura da governança socioambiental e da proteção de direitos fundamentais.

As chamas de injustiça que dão nome a este livro não se extinguem com um capítulo de conclusão. O que estas páginas oferecem, sem pretensão de esgotamento, é um conjunto de sinais empíricos,



padrões documentados e ferramentas analíticas que tornam mais difícil ignorar a dimensão sanitária e jurídica do problema, e que tornam mais fácil, para quem queira agir, saber por onde começar.

Os resultados desta pesquisa não eliminam a necessidade de investigações adicionais nem substituem abordagens causais mais robustas. Contudo, a convergência das evidências apresentadas permite afirmar que os incêndios florestais na Amazônia transcendem a dimensão ambiental e produzem consequências relevantes para a saúde pública, para a proteção de grupos vulneráveis e para a efetividade dos direitos humanos. O desafio colocado não é apenas ambiental, sanitário ou jurídico. É simultaneamente todos eles, exigindo respostas igualmente integradas.



POSFÁCIO

Ao concluir a leitura de *Chamas de Injustiça: Incêndios Florestais, Saúde e Direitos Humanos na Amazônia*, torna-se claro que esta obra ultrapassa a análise dos incêndios florestais. O fogo é aqui o ponto de partida para uma reflexão mais profunda e urgente: o que acontece aos Direitos Humanos quando riscos ambientais previsíveis e recorrentes atingem, de forma desproporcional, territórios, comunidades e vidas humanas?

Acompanhar a génese deste trabalho é para mim motivo de particular satisfação. Conheci Franco Perazzoni quando ingressou no Programa de Pós-Doutoramento em Direitos Humanos, Saúde e Justiça. No âmbito das minhas funções no Observatório de Direitos Humanos nos Países de Língua Oficial Portuguesa (POSCOHR), tenho o privilégio de privar com investigadores que chegam até nós motivados por inquietações profundas. Ver uma ideia inicial, concebida e desenvolvida no âmbito da sua investigação de pós-doutoramento, sob o rigoroso acompanhamento científico da Professora Doutora Alexandra Aragão, transformar-se numa obra desta envergadura é um testemunho gratificante do valor da investigação académica.

Esta obra reflete com precisão a missão fundamental do POSCOHR e a própria essência do Programa de Pós-Doutoramento em Direitos Humanos, Saúde e Justiça: contribuir para a promoção e proteção dos Direitos Humanos no espaço dos países de língua oficial portuguesa, através da formação avançada, da investigação empírica, da educação e da cooperação, aproximando saberes e profissionais de diferentes realidades nacionais, o que demonstra, na prática, que Direitos Humanos, Saúde e Justiça não são domínios estanques, mas dimensões indissociáveis da vida concreta das pessoas.



A relevância desta investigação projeta-se, de igual modo, no seu marcado alcance internacional. Longe de se esgotar no nomadismo académico, a internacionalização da ciência cumpre o seu verdadeiro propósito quando coloca em rede problemas, geografias e quadros normativos distintos. A língua portuguesa surge aqui não apenas como um traço de união linguístico, mas como uma plataforma privilegiada para cruzar experiências transcontinentais e enfrentar desafios que não conhecem fronteiras, sejam as alterações climáticas, as assimetrias no acesso à saúde ou as desigualdades sociais.

Trazer uma realidade tão singular como a amazónica para o ecossistema jurídico e científico de Coimbra, e devolvê-la agora ao mundo sob a forma de livro, evidencia o poder da cooperação transfronteiriça para enriquecer a reflexão global sobre a dignidade humana.

A investigação cruza de forma exemplar múltiplos conhecimentos. Ao relacionar dados geoespaciais e epidemiológicos com a saúde indígena, a infraestrutura sanitária, as percepções locais e a análise jurídica, Franco Perazzoni evidencia que o problema ambiental na Amazónia é também uma questão de saúde pública, de desigualdade territorial e de justiça social. Confronta-nos, assim, com uma pergunta premente: de que serve o reconhecimento formal de um direito, seja à saúde ou a um ambiente saudável, quando escasseiam as condições materiais e territoriais para o seu efetivo exercício?

Mais do que elaborar um diagnóstico, o autor assume o compromisso de propor caminhos, apresentando ferramentas e propostas de intervenção (como o protótipo *Tatatinga*) que aproximam a produção do conhecimento da ação preventiva, da responsabilidade institucional e da Educação para os Direitos Humanos.

O resultado final de uma grande investigação não é oferecer respostas definitivas, mas sim incomodar-nos com as perguntas certas. Ao fechar este livro, somos interpelados a agir: como



transformamos o saber científico em proteção efetiva? Como garantimos que os Direitos Humanos deixam de ser uma promessa abstrata para se tornarem uma realidade vivida?

É pelo rigor, pela empatia e pelo alcance destas inquietações que saúdo esta obra e o percurso do seu autor, certo de que o seu contributo ressoará muito para além das fronteiras da Amazónia.

Miguel Ângelo Oliveira Costa



REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H.; MELLO, C. C. A.; BEZERRA, G. N. **O que é justiça ambiental**. Rio de Janeiro: Garamond, 2009.

AGÊNCIA BRASIL. Queimadas atingiram 30 milhões de hectares no país em 2024. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 24 jun. 2025. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/meio-ambiente/noticia/2025-06/queimadas-atingiram-30-milhoes-de-hectares-no-pais-em-2024. Acesso em: 28 jul. 2026.

ALCÂNTARA, J. A. *et al.* Stepping into a dangerous quagmire: macroecological determinants of Bothrops envenomings, Brazilian Amazon. **PLOS ONE**, v. 13, n. 12, e0208532, 2018. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208532.

ALMON, S. The distributed lag between capital appropriations and expenditures. **Econometrica**, v. 33, n. 1, p. 178-196, 1965. DOI: https://doi.org/10.2307/1911894.

ANDRADE, M. P. de. **Amazônia**: história, economia e território. Cuiabá: EdUFMT, 2016.

ANISTIA INTERNACIONAL. **Da floresta à fazenda**: gado bovino criado ilegalmente na Amazônia brasileira encontrado na cadeia de fornecimento da JBS. Londres: Amnesty International, 2020. (Index AMR 19/2657/2020). Disponível em: https://www.amnesty.org/en/documents/amr19/2657/2020/bp/. Acesso em: 28 jul. 2026.

ANTUNES, M. J.; LOPES, D. (coord.). **Florestas e legislação**: que futuro? Coimbra: Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2019. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/96327. Acesso em: 28 jul. 2026.

ANTUNES, M. J.; LOPES, D. (coord.). **Florestas e legislação**: novos rumos com o Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais e o Programa de Transformação da Paisagem. Coimbra: Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2021. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/97911. Acesso em: 28 jul. 2026.

ANTUNES, M. J.; LOPES, D.; OLIVEIRA, C. (coord.). **Florestas e legislação**: planos municipais da defesa da floresta contra incêndios. Coimbra: Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2020. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/100325. Acesso em: 28 jul. 2026.



ARAGÃO, A. Princípio da precaução: manual de instruções. **Revista do Centro de Estudos de Direito do Ordenamento, do Urbanismo e do Ambiente (RevCEDOUA)**, Coimbra, n. 22, p. 9-57, 2008. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/index.php/revcedoua/article/view/16752/11248. Acesso em: 28 jul. 2026.

ARAGÃO, A. Dimensões europeias do princípio da precaução. *In*: ARAGÃO, A. (coord.). **Direito do ambiente e sustentabilidade**. Coimbra: Coimbra Editora, 2010. v. 7, p. 245-291. Disponível em: https://sigarra.up.pt/fdup/pt/web_gessi_docs.download_file?p_name=F-1034056245/A.7%20(2010)%20p.245-291.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

ARAGÃO, A. **O princípio do poluidor pagador**: pedra angular da política comunitária do ambiente. São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2014. Disponível em: https://www.uc.pt/site/assets/files/432312/livro_completo_poluidor_pagador_alexandra_aragao_planete_verde.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

ARAGÃO, A. Comunicação persuasiva e direito florestal. *In*: ANTUNES, M. J.; LOPES, D.; OLIVEIRA, C. (coord.). **Florestas e legislação**: planos municipais da defesa da floresta contra incêndios. Coimbra: Instituto Jurídico da Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2020. p. 91-122. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/100330?locale=pt. Acesso em: 28 jul. 2026.

ARAGÃO, A. **Direito ambiental**: fundamento, direção e processo para a transição ecológica. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2025. DOI: https://doi.org/10.14195/978-989-26-2733-5.

ARAGÃO, A. *et al.* **Real world restoration**: adaptive planning under uncertainty. [*S. l.*]: SERE Legal Working Group, 2026. (Policy Brief Series, n. 6). DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19499302.

ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. **Science**, v. 328, n. 5983, p. 1275-1278, 2010. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1186925.

ASSUNÇÃO, J.; GANDOUR, C.; ROCHA, R. DETER-ing deforestation in the Amazon: environmental monitoring and law enforcement. **American Economic Journal: Applied Economics**, v. 15, n. 2, p. 125-156, 2023. DOI: https://doi.org/10.1257/app.20200196.

BICHARA, A. A.; CASCARDO JUNIOR, A. G.; PERAZZONI, F. Entre a regulação climática e a transformação digital: o EUDR e a rastreabilidade como condição jurídica para o comércio agroexportador. **Revista Jus Navigandi**, Teresina, ano 30, n. 7975, 2 maio 2025a. Disponível em: https://jus.com.br/artigos/113740. Acesso em: 28 jul. 2026.



BICHARA, A. A.; CASCARDO JUNIOR, A. G.; PERAZZONI, F. O impacto das normas europeias de sustentabilidade no Brasil: riscos, desafios e oportunidades para empresas e juristas. **Revista Jus Navigandi**, Teresina, ano 30, n. 8068, 3 ago. 2025b. Disponível em: https://jus.com.br/artigos/114457. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. **Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Brasília, DF: Presidência da República, 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. **Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012**. Código Florestal. Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011–2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. **Lei n.º 14.944, de 31 de julho de 2024**. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF). Brasília, DF: Presidência da República, 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14944.htm. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. **Decreto n.º 12.189, de 29 de agosto de 2024**. Regulamenta as sanções administrativas relacionadas a incêndios florestais. Brasília, DF: Presidência da República, 2024b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12189.htm. Acesso em: 28 jul. 2026.

BURGESS, R. *et al.* The political economy of deforestation in the tropics. **Quarterly Journal of Economics**, v. 127, n. 4, p. 1707-1754, 2012. DOI: https://doi.org/10.1093/qje/qjs034.

BURNETT, R. *et al.* Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 38, p. 9592-9597, 2018. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115.

BUTT, E. W. *et al.* Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. **Environmental Research Communications**, v. 2, n. 9, 095001, 2020. DOI: https://doi.org/10.1088/2515-7620/abb0db.



CARDOSO, C.; YILMAZ, M. C. Qual foi o país da UE mais afetado por incêndios florestais em 2024? **Euronews**, 8 ago. 2025. Disponível em: https://pt.euronews.com/my-europe/2025/08/08/qual-foi-o-pais-da-ue-mais-afetado-por-incendios-florestais-em-2024. Acesso em: 28 jul. 2026.

CLIMATEMPO. Por que o céu escureceu em São Paulo? **Terra**, 19 ago. 2019. Disponível em: https://www.terra.com.br/noticias/climatempo/por-que-o-ceu-escureceu-em-sao-paulo,4b41360309f3dee36e55063ef20fef1dy0xgiun3.html. Acesso em: 28 jul. 2026.

CNN BRASIL. INPE: queimadas aumentaram 78% em 2024 no Brasil. **CNN Brasil**, 28 ago. 2024. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/inpe-queimadas-aumentaram-78-em-2024-no-brasil/. Acesso em: 28 jul. 2026.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203771587.

COMISSÃO EUROPEIA. **Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2025**. Ispra: Centro Comum de Investigação; Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais (EFFIS), 2026. Disponível em: https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/. Acesso em: 28 jul. 2026.

COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE. **CAMS global atmospheric composition**: near real-time data. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2024. Disponível em: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/cams-global-atmospheric-composition-forecasts. Acesso em: 28 jul. 2026.

CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS. **Opinião Consultiva OC-23/17**: meio ambiente e direitos humanos. São José: Corte IDH, 2017. (Série A, n. 23). Disponível em: https://corteidh.or.cr/docs/opiniones/seriea_23_ing.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

CORTE INTERAMERICANA DE DIREITOS HUMANOS. **Opinião Consultiva OC-32/25**: emergência climática e direitos humanos. São José: Corte IDH, 2025. Disponível em: https://www.corteidh.or.cr/. Acesso em: 28 jul. 2026.

FAN, H. W. *et al.* Snakebites and scorpion stings in the Brazilian Amazon: identifying research priorities for a largely neglected problem. **PLoS Neglected Tropical Diseases**, v. 9, n. 5, e0003701, 2015. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003701.

FIGUEIRA, R. R. **Pisando fora da própria sombra**: a escravidão por dívida no Brasil contemporâneo. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2004.



FILIPPIN, R. F. *et al.* Rastreabilidade, sustentabilidade e direito: o Regulamento Europeu nas exportações de carne bovina. **Consultor Jurídico (ConJur)**, 30 abr. 2025. Disponível em: https://www.conjur.com.br/2025-abr-30/rastreabilidade-sustentabilidade-e-direito-do-regulamento-europeu-nas-exportacoes-de-carne-bovina/. Acesso em: 28 jul. 2026.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS. **Base georreferenciada de Terras Indígenas homologadas (vigente em 31/12/2024)**. Brasília, DF: Ministério dos Povos Indígenas, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/funai. Acesso em: 28 jul. 2026.

IGNOTTI, E. *et al.* Impact on human health of particulate matter emitted from burnings in the Brazilian Amazon region. **Revista de Saúde Pública**, v. 44, n. 1, p. 121-130, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0034-89102010000100013.

IMAFLORA; BOI NA LINHA. **Protocolo de monitoramento de fornecedores de gado da Amazônia, versão 2.0**: diretrizes para a implementação dos Termos de Ajustamento de Conduta com o Ministério Público Federal para a Amazônia e do Compromisso Público da Pecuária. Piracicaba: Imaflora, 2024. Disponível em: https://boinalinha.org. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**: população residente e população indígena por território. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: 12 ago. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Pecuária Municipal (PPM)**: efetivo dos rebanhos por tipo, 2019-2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024a. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de população residente nos municípios brasileiros, 2019-2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024b. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Base georreferenciada de territórios quilombolas titulados (vigente em 31/12/2024)**. Brasília, DF: INCRA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/governanca-fundiaria/quilombolas. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP)**. Brasília, DF: INMET, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 12 ago. 2025.



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de dados de queimadas (BDQueimadas)**: focos de calor detectados por satélite, 2019-2024. São José dos Campos: INPE, 2025a. Disponível em: https://queimadas.dgi.inpe.br/. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE registra queda expressiva de focos de queimadas em 2025. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**, Brasília, DF, 9 out. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/10/inpe-registra-queda-expressiva-de-focos-de-queimadas-em-2025. Acesso em: 28 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Programa de monitoramento do desmatamento na Amazônia Legal por satélite (PRODES)**: incrementos anuais de desmatamento, 2019-2024. São José dos Campos: INPE, 2025c. Disponível em: http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes. Acesso em: 28 jul. 2026.

INTERNATIONAL DEVELOPMENT LAW ORGANIZATION (IDLO). **Climate justice**: a rule of law approach for transformative climate action. Roma: IDLO, 2021. Disponível em: https://www.idlo.int/sites/default/files/pdfs/publications/climate_justice_policy_paper_-_climate_action_-_final.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

KEESING, F. *et al.* Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. **Nature**, v. 468, p. 647-652, 2010. DOI: https://doi.org/10.1038/nature09575.

KRENAK, Ailton. Ailton Krenak: trocamos nossa humanidade por coisas. **Revista Trip**, 26 jun. 2020. Disponível em: https://revistatrip.uol.com.br/trip-fm/ailton-krenak-trocamos-nossa-humanidade-por-coisas. Acesso em: 15 out. 2026.

LAPOLA, D. M. *et al.* Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nclimate2056.

LIMA FILHO, F. L.; BRAGANÇA, A.; ASSUNÇÃO, J. **A economia da pecuária na Amazônia**: grilagem ou expansão da fronteira agropecuária? Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative/PUC-Rio, 2021. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/a-economia-da-pecuaria-na-amazonia-grilagem-ou-expansao-da-fronteira-agropecuaria/. Acesso em: 28 jul. 2026.

MAPBIOMAS. Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil (1985–2024). **MapBiomas Brasil**, 2025. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/. Acesso em: 2 out. 2026.



MAPBIOMAS. **Mapeamento anual de área queimada no Brasil**: Coleção Fogo 4 (1985-2024). São Paulo: MapBiomas Brasil, 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/fires. Acesso em: 28 jul. 2026.

MAPBIOMAS. Área queimada no Brasil cresce 79% em 2024 e supera os 30 milhões de hectares. **MapBiomas**, 22 jan. 2025a. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/en/2025/01/22/area-queimada-no-brasil-cresce-79-em-2024-e-supera-os-30-milhoes-de-hectares/. Acesso em: 28 jul. 2026.

MAPBIOMAS. Área queimada no Brasil em 2024 supera média histórica em 62%. **MapBiomas**, 24 jun. 2025b. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/2025/06/24/area-queimada-no-brasil-em-2024-supera-media-historica-em-62/. Acesso em: 28 jul. 2026.

MARTINS, L. K. P.; PERAZZONI, F.; JANDUCCI, J. P. Z. A floresta metaversa: criminalidade ambiental organizada e indústria madeireira na Amazônia brasileira. *In*: PERAZZONI, F.; PEREIRA, E. (org.). **Criminalidade ambiental organizada**. São Paulo: Tirant lo Blanch, 2024. p. 35-70.

MATAVELI, G. A. V. *et al.* Characterization and trends of fine particulate matter (PM2.5) fire emissions in the Brazilian Cerrado during 2002-2017. **Remote Sensing**, v. 11, n. 19, 2254, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11192254.

MATAVELI, G. A. V. *et al.* Relationship between biomass burning emissions and deforestation in Amazonia over the last two decades. **Forests**, v. 12, n. 9, 1217, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/f12091217.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Identificação Individual de Bovinos e Búfalos (SISBOV)**. Brasília, DF: MAPA, 2025. Disponível em: https://sisbov.agricultura.gov.br/. Acesso em: 28 jul. 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Sistema de informação do programa nacional de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade do ar (VIGIAR)**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiar. Acesso em: 28 jul. 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Cadastro nacional de estabelecimentos de saúde (CNES)**: recursos físicos, equipamentos e profissionais de saúde, 2019-2024. Brasília, DF: DATASUS, 2024a. Disponível em: http://cnes.datasus.gov.br. Acesso em: 28 jul. 2026.



MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Sistemas de Informações Hospitalares e Ambulatoriais do SUS (SIH-SUS e SIA-SUS)**: morbidade hospitalar e produção ambulatorial por município de residência, 2019-2024. Brasília, DF: DATASUS, 2024c. Disponível em: https://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude-tabnet/. Acesso em: 28 jul. 2026.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Sistema de informação da atenção à saúde indígena (SIASI)**. Brasília, DF: SESAI, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/sesai. Acesso em: 28 jul. 2026.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL. **Programa Carne Legal**. Brasília, DF: MPF, 2009. Disponível em: https://linhadotempo.mpf.mp.br/www/linha-do-tempo/2009. Acesso em: 28 jul. 2026.

MOREIRA, V.; GOMES, C. M. (coord.). **Compreender os direitos humanos**: manual de educação para os direitos humanos. Coimbra: Ius Gentium Conimbrigae/Centro de Direitos Humanos, Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2013. Disponível em: https://www.igc.fd.uc.pt/manual/pdfs/manual_completo.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)**: índices de vegetação (NDVI). Sioux Falls: NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2025. Disponível em: https://modis.gsfc.nasa.gov/. Acesso em: 28 jul. 2026.

OGUNBODE, C. A. Climate justice is social justice in the Global South. **Nature Human Behaviour**, v. 6, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41562-022-01456-x.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolução n. 2.200-A (XXI)**. Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais. Nova York: ONU, 1966. Disponível em: https://www.oas.org/dil/port/1966%20Pacto%20Internacional%20sobre%20os%20Direitos%20Econ%C3%B3micos,%20Sociais%20e%20Culturais.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolução 45/94**: necessidade de assegurar um ambiente saudável para o bem-estar das pessoas (A/RES/45/94). Nova York: ONU, 14 dez. 1990. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/105298. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento** (A/CONF.151/26). Rio de Janeiro: ONU, 1992. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/154750. Acesso em: 28 jul. 2026.



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Comentário Geral n.º 14**: o direito ao mais alto nível possível de saúde (artigo 12 do Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais) (E/C.12/2000/4). Genebra: ONU, 2000. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/425041. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração das Nações Unidas sobre os direitos dos povos indígenas** (A/RES/61/295). Nova York: ONU, 2007. Disponível em: https://www.un.org/esa/socdev/unpfii/documents/DRIPS_pt.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Princípios orientadores sobre empresas e direitos humanos**: implementação do quadro das Nações Unidas "proteger, respeitar e reparar". Genebra: Alto Comissariado das Nações Unidas para os Direitos Humanos, 2011. Disponível em: https://www.ohchr.org/en/publications/reference-publications/guiding-principles-business-and-human-rights. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolução 76/300**: o direito humano a um meio ambiente limpo, saudável e sustentável. Nova York: ONU, 2022. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/3983329. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Resolução 77/276**: pedido de parecer consultivo ao Tribunal Internacional de Justiça sobre as obrigações dos Estados em relação às mudanças climáticas (A/RES/77/276). Nova York: ONU, 2023. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/4008332. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO. **Convenção n.º 169 sobre povos indígenas e tribais em países independentes**. Genebra: OIT, 1989. Disponível em: https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO:12100:P12100_INSTRUMENT_ID:312314:NO. Acesso em: 28 jul. 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **One Health**. Genebra: OMS, 2021. Disponível em: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/one-health. Acesso em: 28 jul. 2026.

PERAZZONI, F. A nova arquitetura de governança do fogo no Brasil: PNMIF e regime sancionatório. **Jus Navigandi**, Teresina, 2025a. Disponível em: https://jus.com.br/artigos/116487. Acesso em: 28 jul. 2026.

PERAZZONI, F. Crise das queimadas um ano depois: resultados, lições e o que ainda falta fazer. **ConJur (Em Análise)**, 2025b.



PERAZZONI, F. *et al.* The future of agribusiness is digital: tokens, blockchain and crypto in the field. **LiveCoins**, 2025c. Disponível em: https://livecoins.com.br/the-future-of-agribusiness-is-digital-tokens-blockchain-and-crypto-in-the-field/. Acesso em: 28 jul. 2026.

PERAZZONI, F. *et al.* Blockchain na Amazônia: como os Paiter Suruí da Aldeia Gamir usam Web3 para proteger a floresta. **LiveCoins**, 2025d. Disponível em: https://livecoins.com.br/blockchain-na-amazonia-como-os-paiter-surui-da-aldeia-gamir-usam-web3-para-proteger-a-floresta-e-conquistar-autonomia/. Acesso em: 28 jul. 2026.

PERAZZONI, F.; BACELAR-NICOLAU, P.; PAINHO, M. Geointelligence against illegal deforestation and timber laundering in the Brazilian Amazon. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 6, 398, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/ijgi9060398.

PERAZZONI, F.; CASCARDO JUNIOR, A. G. Direito amazônico e constitucionalismo territorial: por uma hermenêutica constitucional territorializada na Amazônia. **Revista de Direito da Amazônia**, Manaus, v. 3, n. 1, 2026. Disponível em: https://rda.tjam.jus.br/ojs-3/index.php/DireitoAmazonia/article/view/159/122. Acesso em: 28 jul. 2026.

PERAZZONI, F. *et al.* Forensic environmental analytics for human rights under climate change: a data-driven model of wildfire health impacts. *In*: TRIENNIAL MEETING OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FORENSIC SCIENCES, 24., 2026, Sofia. **[Apresentação oral]**. Sofia: IAFS, 2026. Disponível em: https://iafs2026.com/. Acesso em: 28 jul. 2026.

PEREIRA, E.; PERAZZONI, F. Criminalidade ambiental organizada: generalidades, especificidades e tendências. *In*: PERAZZONI, F.; PEREIRA, E. (org.). **Criminalidade ambiental organizada**. São Paulo: Tirant lo Blanch, 2024. p. 15-33.

PIEPHO, H. P. *et al.* BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. **Euphytica**, v. 161, n. 1, p. 209-228, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8.

POPE, C. A.; DOCKERY, D. W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 56, n. 6, p. 709-742, 2006. DOI: https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485.

PORTUGAL. **Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020, de 16 de junho**. Aprova o Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais. Diário da República, 1.ª série, n. 115, 2020. Disponível em: https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/45-a-2020-135843143. Acesso em: 28 jul. 2026.



PORTUGAL. **Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro**. Estabelece o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais no território continental. Diário da República, 1.ª série, n. 199, 2021. Disponível em: https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163. Acesso em: 28 jul. 2026.

PRIST, P. R. *et al.* Protecting Brazilian Amazon Indigenous territories reduces atmospheric particulates and avoids associated health impacts and costs. **Communications Earth & Environment**, v. 4, 34, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-023-00704-w.

PROGRAMA BRASIL MAIS. **RedeMAIS**: plataforma de monitoramento por satélite (PF-SCCON). Brasília, DF: Ministério da Justiça e Segurança Pública, [s. d.]. Disponível em: https://plataforma.redemaisbr.com.br. Acesso em: 28 jul. 2026.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD); INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA); FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil**: índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM), 2010-2022. Brasília, DF: PNUD, 2022. Disponível em: http://atlasbrasil.org.br. Acesso em: 28 jul. 2026.

PYNE, S. J. **Fire**: a brief history. Seattle: University of Washington Press, 2001. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/j.ctvcwnf8f. Acesso em: 28 jul. 2026.

REDDINGTON, C. L. *et al.* Air quality and human health improvements from reductions in deforestation-related fire in Brazil. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 768-771, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/ngeo2535.

REQUIA, W. J. *et al.* Health impacts of wildfire-related air pollution in Brazil: a nationwide study of more than 2 million hospital admissions between 2008 and 2018. **Nature Communications**, v. 12, 6555, 2021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-021-26822-7.

RESCO DE DIOS, V. Piroceno: o que é a era do fogo que vivemos e como controlar seus efeitos. **BBC News Brasil**, 23 ago. 2023. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/articles/cv21m0xz8yvo. Acesso em: 28 jul. 2026.

RESENDE, M. D. V. de. **SELEGEN-REML/BLUP**: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/290975. Acesso em: 28 jul. 2026.

RODRÍGUEZ-GARAVITO, C. (ed.). **Litigating the climate emergency**: how human rights, courts, and legal mobilization can bolster climate action. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009106214.



ROSSI, M. **O cerco**: a Amazônia invadida pelo gado. São Paulo: Todavia, 2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR)**. Brasília, DF: SFB, 2025. Disponível em: https://www.car.gov.br/. Acesso em: 28 jul. 2026.

SETZER, A.; MORELLI, F.; SOUZA, J. C. O banco de dados de queimadas do INPE. **Biodiversidade Brasileira**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v9i1.1289.

SETZER, J.; HIGHAM, C. **Global trends in climate change litigation**: 2024 snapshot. Londres: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics and Political Science, 2024. Disponível em: https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/global-trends-in-climate-change-litigation-2024-snapshot/. Acesso em: 28 jul. 2026.

SILVEIRA, M. V. F. *et al.* Drivers of fire anomalies in the Brazilian Amazon: lessons learned from the 2019 fire crisis. **Land**, v. 9, n. 12, 516, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/land9120516.

SOUSA, E. C. S.; CORTES, J. P. S. Transporte fluvial e desafios no acesso à saúde em comunidades ribeirinhas nas hidrovias Tapajós e Arapiuns. **Hygeia**, v. 20, e20091, 2024. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/68928. Acesso em: 28 jul. 2026.

SPONCHIADO, S.; PERAZZONI, F. Modelo de predição de incêndios florestais utilizando REML/BLUP [resumo estendido]. *In*: **InterForensics 2025**. [*S. l.*: *s. n.*], 2025.

SPONCHIADO, S.; PERAZZONI, F.; MAGLIANO, M. M. Modelo de predição de incêndios florestais utilizando REML/BLUP: uma proposta abrangente para a Amazônia Legal e implicações para prevenção e justiça. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS (COBREAP), 23., 2025. **Anais** [...]. [*S. l.*]: IBAPE, 2025. Disponível em: https://biblioteca.ibape-nacional.com.br/wp-content/uploads/2025/12/5306.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

STACEY, J. *et al.* Reclaiming fire: resistance, resurgence and Indigenous jurisdiction in the climate emergency. **Journal of Human Rights and the Environment**, 2025. DOI: https://doi.org/10.4337/jhre.2025.0007.



SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. **Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental n.º 708** (Caso Fundo Clima). Relator: Min. Luís Roberto Barroso. Brasília, DF: STF, 2022. Disponível em: https://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=5951856. Acesso em: 28 jul. 2026.

SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. **Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental n.º 760** (Caso PPCDAm). Relatora: Min. Cármen Lúcia. Brasília, DF: STF, 2024. Disponível em: https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/noticiaNoticiaStf/anexo/VOTOADPF760.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

TRIBUNAL INTERNACIONAL DE JUSTIÇA. **Obrigações dos Estados em relação às mudanças climáticas**: parecer consultivo de 23 de julho de 2025. Haia: CIJ, 2025. Disponível em: https://icj-cij.org/sites/default/files/case-related/187/187-20250723-adv-01-00-en.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

TRIBUNAL INTERNACIONAL DO DIREITO DO MAR. **Parecer consultivo sobre as alterações climáticas e o direito internacional do mar** (Caso n. 31). Hamburgo: ITLOS, 2024. Disponível em: https://www.itlos.org/. Acesso em: 28 jul. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2023/1115 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 31 de maio de 2023**. Relativo à disponibilização no mercado da União e à exportação a partir da União de determinadas mercadorias e produtos associados à desflorestação e à degradação florestal [EUDR]. Jornal Oficial da União Europeia, L 150, 9 jun. 2023. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32023R1115. Acesso em: 28 jul. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento de Execução (UE) 2025/1093 da Comissão, de 22 de maio de 2025**. Estabelece regras de execução do Regulamento (UE) 2023/1115 do Parlamento Europeu e do Conselho no respeitante à lista de países que apresentam um risco baixo ou alto de produzir produtos de base em causa que resultam em produtos derivados em causa que não cumprem o disposto no artigo 3.º, alínea a). Bruxelas: Comissão Europeia, 2025a. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32025R1093. Acesso em: 28 jul. 2026.

UNIÃO EUROPEIA. **Resolução do Parlamento Europeu, de 9 de julho de 2025, sobre o Regulamento de Execução (UE) 2025/1093**. Estrasburgo: Parlamento Europeu, 2025b. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=OJ:C_202602306. Acesso em: 28 jul. 2026.



UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2025/2650 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de dezembro de 2025**. Altera o Regulamento (UE) 2023/1115 no respeitante a determinadas obrigações dos operadores e comerciantes. Jornal Oficial da União Europeia, L, 2025/2650, 23 dez. 2025c. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32025R2650. Acesso em: 28 jul. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. Estudo aponta que na Amazônia o desmatamento cai, mas queimadas aumentam. **UFPB**, João Pessoa, 2024. Disponível em: https://www.ctdr.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/estudo-aponta-que-na-amazonia-o-desmatamento-cai-mas-queimadas-aumentam. Acesso em: 28 jul. 2026.

VAN DONKELAAR, A. *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. **Environmental Health Perspectives**, v. 118, n. 6, p. 847-855, 2010. DOI: https://doi.org/10.1289/ehp.0901623.

VEIGA, R. M. da *et al.* Recognition of Loss & Damage from wildfires is key for climate justice. **Communications Earth & Environment**, v. 6, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-025-02968-w.

VIEGAS, D. X. *et al.* **Greenpeace report on wildfires in Portugal**: more than 80 years of data show that the country must change. Lisboa: Greenpeace Portugal; ADAI, Universidade de Coimbra, 2026. Resumo executivo. Disponível em: https://www.greenpeace.pt/wp-content/uploads/2026/06/GREENPEACE_RELATORIO_COMPLETO_INCENDIOS_ENG.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

WWF BRASIL. Brasil tem queda de 23% na área queimada em 2025, mas Caatinga registra aumento no fogo. **WWF Brasil**, 16 mar. 2026. Disponível em: https://www.wwf.org.br/?94300. Acesso em: 28 jul. 2026.

YE, T. *et al.* Short-term exposure to wildfire-related PM2.5 increases mortality risks and burdens in Brazil. **Nature Communications**, v. 13, 7651, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-35326-x.



APÊNDICES

APÊNDICE A:
BASES DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO DOS DADOS

Este apêndice centraliza a documentação das bases de dados, dos procedimentos de tratamento e do ambiente analítico que sustentam as análises dos Capítulos 1, 2 e 3. Todas as fontes são públicas e oficiais, em sua maioria federais, e foram acessadas nas versões mais recentes disponíveis durante a pesquisa. O tratamento, a integração e as análises foram conduzidos predominantemente em ambiente Python. A documentação organiza-se por tipo de base, dos dados ambientais e de fogo aos de saúde e aos territoriais e socioeconômicos, seguindo-se a descrição dos procedimentos de integração e tratamento, das limitações reconhecidas e do ambiente computacional.

Bases ambientais e de fogo. Os focos de incêndio provêm do Programa Queimadas do INPE (2025a), que compila as detecções de uma constelação de satélites. Para assegurar a comparabilidade temporal da série, adotou-se de forma consistente o satélite de referência AQUA, na passagem da tarde, totalizando 1.273.473 registros entre 2019 e 2024. A área queimada provém do MapBiomas Fogo (Coleção 4), produto de classificação de cicatrizes de incêndio derivado de imagens de satélite de média resolução; a concentração de PM2.5 à superfície provém do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS/ECMWF), obtida da reanálise global EAC4 (ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4), de resolução espacial aproximada de 80 km, que combina observações de satélite e modelo



atmosférico por assimilação de dados quadridimensional (4D-Var). A série utilizada foi extraída ao nível municipal, em valores diários por município (séries de média diária e de máximo diário para os 5.565 municípios brasileiros no período 2003–2024), posteriormente agregada à escala mensal para compatibilizar-se com a estrutura município-mês do painel. A opção pela reanálise, em vez de produtos de recuperação direta por satélite, deve-se à sua cobertura espacial completa, que fornece estimativa em todos os pontos de grade mesmo onde inexistem estações de medição em solo, como ocorre na maior parte da Amazônia, vantagem de cobertura que, todavia, não elimina as limitações de precisão em ambiente tropical úmido discutidas na seção 2.3. Como preditores ambientais e climáticos do modelo de predição de focos utilizaram-se ainda a temperatura e a umidade relativa (do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, cujo Banco de Dados Meteorológicos fornece as séries históricas; Instituto Nacional de Meteorologia [INMET], 2025), o índice de vegetação NDVI (do sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua da agência espacial norte-americana; National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2025) e a cobertura do solo e o corte raso (PRODES [INPE, 2025c] e MapBiomas – Coleção 10).

Bases de saúde. Os desfechos sanitários provêm do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS), nas bases SIH-SUS, de internações hospitalares, e SIA-SUS, de atendimentos ambulatoriais. Dada a magnitude dos registros, a extração foi conduzida por meio de rotina automatizada (*script*) de consulta ao DATASUS. Coletou-se inicialmente uma janela de dez anos, de 2014 a 2024, para fins exploratórios, posteriormente restringida a 2019–2024 nas análises, de modo a alinhar as séries de saúde ao período de maior qualidade e comparabilidade dos dados ambientais. A seleção de nove categorias diagnósticas da CID-10 combinou dois critérios: de um lado, a literatura sobre agravos associados à fumaça e à exposição ao fogo, sobretudo as doenças do aparelho respiratório, do aparelho circulatório e as afecções oculares; de outro, hipóteses



exploratórias de natureza ecológica, segundo as quais a queima de habitats poderia deslocar animais peçonhentos para áreas habitadas, e a perda de predadores naturais de vetores, como aves e répteis, poderia favorecer a proliferação de mosquitos e, por consequência, de arboviroses. Por isso o desenho incluiu, além dos agravos diretos, as doenças infecciosas, as zoonoses, as enfermidades transmitidas por vetores e os acidentes por animais peçonhentos, vias indiretas que, registre-se, as análises não vieram a confirmar. Excluíram-se ainda os códigos da COVID-19 e da síndrome respiratória aguda grave (SRAG), bem como outros potenciais confundidores, para que as séries não refletissem o surto pandêmico; coerentemente, não se observa pico de internações em 2020–2021 nas séries utilizadas. Os dados foram agregados por município e por mês e padronizados por 100.000 habitantes, no período 2019–2024. As categorias e os respectivos códigos selecionados estão apresentados no Quadro 1. A trajetória da saúde indígena foi caracterizada a partir do Sistema de Informação da Atenção à Saúde Indígena (SIASI/SESAI/MS), com cerca de 1,82 milhão de registros desagregados por Distrito Sanitário Especial Indígena, polo base, aldeia, categoria profissional e faixa etária (2020–2025), cruzados com a população indígena por Terra Indígena do Censo 2022 do IBGE.

Quadro 1 – Categorias diagnósticas e respectivos códigos CID-10 selecionados para a extração no DATASUS

Categoria	Condições e respectivos códigos CID-10
Respiratórias e relacionadas à poluição do ar	asma (J45); doença pulmonar obstrutiva crônica (J44); pneumonia (J18); bronquite aguda (J20); rinite alérgica (J30)
Cardiovasculares	infarto agudo do miocárdio (I21); acidente vascular cerebral (I63); insuficiência cardíaca (I50)
Infecciosas: zoonoses e transmitidas por vetores	malária (B50-B54); dengue (A90); chikungunya (A92.0); febre amarela (A95); zika (A92.8); leishmaniose visceral (B55); tungíase (B88); encefalite (A83); riquetsioses, incluindo a febre maculosa (A75); raiva (A82); leptospirose (A27); cisticercose (B69); toxoplasmose (B58); criptococose (B45)



Categoria	Condições e respectivos códigos CID-10
Oculares e das vias aéreas superiores	conjuntivite (H10); irritação das vias aéreas superiores (J30)
Dermatológicas	dermatite de contato (L23); eczema (L30)
Psicológicas e mentais	transtorno de estresse pós-traumático (F43.1); transtornos de ansiedade (F41)
Envenenamentos e toxicidade	envenenamento por gases e produtos químicos, incluindo monóxido de carbono e cianeto (T58)
Relacionadas à qualidade da água	diarreia e gastroenterites de origem presumivelmente infecciosa (A00-A09)
Acidentes por animais peçonhentos	picada de serpente (T63.0); de escorpião (T63.2); de aranha (T63.4)

Fonte: elaboração própria.

Nota: Excluídos os códigos da COVID-19 e da síndrome respiratória aguda grave (SRAG).

Bases territoriais e socioeconômicas. Os limites de 638 Terras Indígenas provêm do shapefile oficial da Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI), preservados como polígonos individuais, e os de 94 Territórios Quilombolas do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). O rebanho bovino municipal provém da Pesquisa da Pecuária Municipal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE/PPM); o Índice de Desenvolvimento Humano, do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD); e o domínio fundiário, que distingue áreas públicas de privadas, da malha cadastral utilizada na análise de grilagem do Capítulo 1.

Integração e tratamento. A integração geoespacial cruzou os focos com os polígonos territoriais, Terras Indígenas, Territórios Quilombolas e municípios, pela metodologia ponto-em-polígono, preservando cada polígono como unidade de análise. A análise dos impactos sanitários combinou duas abordagens complementares, detalhadas na seção 2.4: a descrição da sazonalidade mensal de cada categoria diagnóstica, o calendário sanitário do fogo, e um modelo de painel com efeitos fixos de município e de ano-mês, estimado por pseudomáxima verossimilhança de Poisson, com controles climáticos e defasagens de zero a três meses, conduzido separadamente



para a Amazônia Legal e o Resto do Brasil. Os procedimentos de limpeza incluíram a padronização de códigos municipais, o tratamento de valores ausentes e a harmonização das séries temporais; as validações compreenderam a conferência de totais, a inspeção de consistência entre bases e a verificação de valores atípicos.

Limitações. As estimativas de PM2.5 por reanálise apresentam desempenho reduzido como proxy estatístico bruto em ambiente tropical úmido, conforme discutido na seção 2.3; os dados ambulatoriais do SIA-SUS estão sujeitos a subnotificação e a variações de cobertura; e a agregação municipal-mensal, ainda que mais fina do que a estadual, restringe a inferência ao nível populacional, e não individual. Cabe registrar, ademais, uma limitação específica da atribuição espacial dos focos por Terra Indígena: por cruzar as coordenadas dos focos do satélite AQUA com os polígonos individuais do shapefile da FUNAI, a contagem por Terra Indígena pode divergir dos totais consolidados do Programa Queimadas do INPE, que agrega Terras Indígenas contíguas sob um único nome; diferenças de versão do shapefile, de projeção cartográfica e de tratamento dos pontos nas bordas dos polígonos também geram pequenas variações. Por isso, os números de focos por Terra Indígena destinam-se à análise relacional com a saúde (seção 2.6.1) e não substituem os totais territoriais consolidados do Capítulo 1. Todas essas limitações estão registradas nos pontos pertinentes do texto principal.

Ambiente computacional. As análises foram conduzidas em Python 3.11. A manipulação de dados utilizou pandas e *NumPy*; a análise geoespacial, GeoPandas; a modelagem estatística e econométrica, *statsmodels* e *linearmodels*; e a produção de gráficos, mapas e figuras, *matplotlib* e *seaborn*. Este apêndice documenta os dados e os procedimentos analíticos, não constituindo documentação técnica de software.



APÊNDICE B:
INSTRUMENTO E RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO ESTRUTURADO

Este apêndice apresenta de forma integrada o instrumento de coleta de dados aplicado no diagnóstico de percepções institucionais discutido na seção 2.9, e a síntese qualitativa dos resultados correspondentes. A seção B.1 reproduz a versão completa do questionário; as seções B.2 e B.3 apresentam, respectivamente, a análise de consenso e divergência entre perfis e a síntese das percepções centrais. Por se tratar de instrumento qualitativo e exploratório, os resultados são lidos questão a questão, e não como escores de escala. Os gráficos de distribuição das respostas por tema são apresentados no corpo principal (Figuras 33 a 36, seção 2.9).

B.1 INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

O instrumento foi aplicado a 124 respondentes em quatro perfis. Cada respondente respondeu ao bloco específico do seu perfil e ao Bloco Geral de Governança e Políticas Públicas. Respostas em escala Likert de 7 pontos (1 = Discordo totalmente; 7 = Concordo totalmente), salvo indicação específica.

A aplicação foi voluntária e anônima (*sem assinatura e sem coleta de nome ou de e-mail)* e precedida de consentimento livre e esclarecido, nos termos do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) reproduzido a seguir.



Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

Pesquisa: Chamas de Injustiça, Incêndios Florestais, Saúde e Direitos Humanos na Amazônia. Pesquisador responsável: Franco Perazzoni, Programa de Pós-Doutoramento em Direitos Humanos, Saúde e Justiça (IGC/CDH e POSCOHR).

Convite. Você está sendo convidado(a) a participar, de forma voluntária, de uma pesquisa acadêmica sobre as percepções de diferentes atores a respeito dos incêndios na Amazônia e de seus efeitos sobre a saúde e os direitos humanos.

O que você fará. Responder a um questionário on-line e anônimo, com um bloco do seu perfil (saúde; bombeiros e defesa civil; fiscalização e justiça; ou comunidades tradicionais e indígenas) e um bloco geral, em escala de 1 a 7. Leva cerca de 10 a 15 minutos.

Riscos e benefícios. Os riscos são mínimos; se alguma pergunta lhe causar desconforto, você pode parar quando quiser. Não há pagamento nem benefício direto: sua participação ajuda a melhorar as políticas de prevenção, resposta ao fogo e proteção da saúde das populações mais vulneráveis.

Sigilo e dados. O questionário não coleta nome nem e-mail. As respostas são analisadas de forma agregada, apenas para fins acadêmicos, e tratadas conforme a LGPD (Lei n.º 13.709/2018) e o RGPD (Regulamento UE n.º 679/2016, de 27 de abril).

Voluntariedade. A participação é livre; recusar ou desistir não traz qualquer prejuízo.

Dúvidas. Quaisquer dúvidas sobre a pesquisa podem ser esclarecidas diretamente com o pesquisador responsável, por meio do e-mail: franco.perazzoni@unb.br.

Pergunta de consentimento (obrigatória). *Li e compreendi as informações acima, tive oportunidade de esclarecer dúvidas e*



concordo, de forma livre e esclarecida, em participar respondendo ao questionário. Sei que posso parar a qualquer momento, sem prejuízo.

Bloco A, profissionais de saúde

I-A. Em minha prática profissional, observo aumento de atendimentos por doenças respiratórias, cardiovasculares ou outras condições durante ou após períodos de queimadas intensas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

II-A. O sistema de saúde local dispõe de recursos e infraestrutura adequados para atender o aumento de demanda durante crises de queimadas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

III-A. Há protocolos ou planos de contingência específicos para responder a agravos de saúde causados por queimadas na minha instituição.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

IV-A. Os sistemas de informação epidemiológica disponíveis permitem identificar rapidamente o impacto das queimadas sobre a saúde da população local.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

V-A. A formação profissional na minha área prepara adequadamente os profissionais para lidar com os efeitos das queimadas sobre a saúde.



1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VI-A. As populações mais vulneráveis nas regiões afetadas têm acesso adequado a serviços de saúde durante e após os eventos de fogo.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VII-A. Há integração efetiva entre os serviços de saúde e os sistemas de monitoramento ambiental para alertas precoces sobre riscos à saúde por queimadas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

Bloco B, bombeiros e agentes de defesa civil

I-B. Os recursos materiais disponíveis (equipamentos, viaturas, aeronaves) são suficientes para o combate eficaz aos incêndios florestais nas áreas de minha atuação.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

II-B. II-B. O efetivo humano disponível é adequado para responder com agilidade e eficácia aos focos de incêndio na região.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

III-B. Tenho acesso a sistemas de monitoramento, dados de satélite ou ferramentas preditivas que orientam as operações de combate e prevenção.



1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

IV-B. A coordenação entre os órgãos envolvidos no combate aos incêndios (bombeiros, defesa civil, IBAMA, exército) é eficaz e ágil.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

V-B. Os planos de contingência e prevenção de incêndios florestais são adequados e aplicados de forma consistente nas regiões de maior risco.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VI-B. A formação e o treinamento recebidos preparam adequadamente os profissionais para enfrentar incêndios de grande porte em contextos amazônicos.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VII-B. As ações de prevenção implementadas nos últimos anos reduziram efetivamente o número e a intensidade dos incêndios na região.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

Bloco C, agentes de fiscalização e do sistema de justiça

I-C. Os órgãos de fiscalização ambiental dispõem de recursos humanos e materiais suficientes para monitorar e responder a incêndios ilegais na Amazônia Legal.



1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

II-C. O arcabouço legal disponível é suficiente para responsabilizar efetivamente os autores de incêndios ilegais.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

III-C. Tenho acesso a tecnologias e dados (georreferenciamento, sensoriamento remoto, rastreabilidade fundiária) que subsidiam a investigação e responsabilização de incêndios criminosos.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

IV-C. A integração entre os órgãos de fiscalização, o Ministério Público e o sistema de justiça é eficaz para converter autuações em responsabilização efetiva.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

V-C. As evidências técnicas produzidas nas investigações de incêndios são suficientemente robustas para sustentar processos administrativos e judiciais.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VI-C. Existe pressão política ou institucional que limita a efetividade das ações de fiscalização e responsabilização por incêndios ilegais.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)



VII-C. As punições aplicadas a responsáveis por incêndios ilegais têm efeito dissuasório efetivo sobre novos casos.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

20-C. A identificação e responsabilização de autores de incêndios ilegais ocorrem com frequência.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

22-C. As autuações administrativas e os inquéritos policiais relacionados a incêndios ilegais resultam em punições efetivas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

Bloco D, comunidades tradicionais e indígenas

I-D. As queimadas que ocorrem no território da minha comunidade afetam negativamente a saúde, o modo de vida e os recursos naturais de que dependemos.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

II-D. A comunidade tem conseguido acessar serviços de saúde adequados durante os períodos de queimadas intensas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

III-D. As lideranças e membros da comunidade participam efetivamente das decisões sobre manejo do fogo e prevenção de incêndios no nosso território.



1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

IV-D. Os órgãos governamentais consultam nossa comunidade antes de tomar decisões que afetam nosso território em relação ao manejo do fogo.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

V-D. Nossa comunidade tem acesso a informações claras e acessíveis sobre os riscos das queimadas e as medidas de proteção disponíveis.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VI-D. Quando ocorrem incêndios que atingem o território da comunidade, o poder público responde com rapidez e eficácia.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VII-D. As práticas tradicionais de manejo do fogo da nossa comunidade são reconhecidas e respeitadas pela legislação e pelos órgãos de fiscalização.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VII-D. Os incêndios que afetam nosso território têm relação com invasões de terra, desmatamento ou atividades ilegais externas à comunidade.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)



XVII-D. Durante os períodos de maior incidência de queimadas, é difícil acessar serviços de saúde para tratar os problemas causados pela fumaça e pelo fogo.

Escala: 0 = Nenhuma dificuldade / 7 = Dificuldade extrema

XXX-D. O apoio governamental recebido após incêndios que afetaram nossa comunidade foi efetivo e suficiente para a recuperação.

Escala: 0 = Nenhum apoio / 7 = Apoio totalmente suficiente

27-D. As denúncias feitas pela comunidade sobre incêndios ilegais resultam em ações concretas das autoridades.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

Bloco geral, governança e políticas públicas (todos os perfis)

As questões a seguir foram respondidas por todos os participantes, independentemente do perfil.

II. As ações do governo atuais são suficientes para prevenir e controlar incêndios nas áreas mais afetadas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

V. Existe orçamento suficiente e regular para prevenção, combate e mitigação dos incêndios florestais.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VI. As ações do governo chegam às regiões mais remotas e vulneráveis afetadas pelos incêndios.



1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

VII. As políticas públicas consideram as desigualdades territoriais e sociais no enfrentamento dos incêndios.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

XI. Os responsáveis por queimadas ilegais são efetivamente responsabilizados e punidos.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

XIV. As populações afetadas pelas queimadas participam da construção de políticas públicas.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

XV. As informações oficiais sobre queimadas, saúde e ambiente são acessíveis e transparentes para a população.

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 (1 = Discordo totalmente / 7 = Concordo totalmente)

B.2 PERCEPÇÕES SOBRE IMPUNIDADE E GOVERNANÇA: ANÁLISE DE CONSENSO E DIVERGÊNCIA

O Quadro 2 sintetiza a percepção dominante de cada grupo para as questões centrais dos dois blocos temáticos principais. Uma percepção foi classificada como dominante quando o percentual de respostas na respectiva categoria superou 40%.



Quadro 2 – Percepção dominante por questão e perfil

Questão	Saúde	Bombeiros	Fiscalização/Justiça	Comunidades Tradicionais
XI – Impunidade geral	Discordância	Discordância	Discordância	Discordância (97%)
20-C – Identificação frequente	Discordância	Discordância	Neutralidade	Neutralidade
22-C – Punições efetivas	Discordância	–	Neutralidade	Neutralidade
27-D – Denúncias resultam em ação	Discordância	Discordância	Discordância	Discordância (73%)
II – Ações gov. suficientes	Discordância	Neutralidade	Neutralidade	Discordância
V – Orçamento suficiente	Discordância	Neutralidade	Discordância	Neutralidade
VI – Ações chegam a vulneráveis	Discordância	Discordância	Discordância	Discordância
XIV – Participação popular	Discordância	Discordância	Neutralidade	Discordância (76%)
XV – Informações acessíveis	Discordância	Neutralidade	Neutralidade	Discordância (64%)

Fonte: dados do questionário aplicado pelo autor (n = 124); elaboração própria.

Nota: Discordância = 1-2; Neutralidade = 3-5; Concordância = 6–7. (–) = questão não aplicável ao perfil.

B.3 PERCEPÇÕES CENTRAIS: SÍNTESE QUALITATIVA

Nas questões centrais de governança, a percepção foi consistentemente crítica em todos os perfis. A afirmação de que os responsáveis por queimadas ilegais são efetivamente punidos (XI) foi rejeitada de forma quase unânime, com as comunidades tradicionais no polo mais extremo de discordância. Por se tratar de instrumento qualitativo, esses padrões são reportados como direção e intensidade da percepção, e não como escores médios. A suficiência das ações governamentais (II) e do orçamento público (V) recebeu, igualmente, avaliação fortemente negativa em todos os perfis. Dificuldade de acesso à saúde durante queimadas (XVII-D,



Comunidades): Média 6,32/7 (DP 0,89). Apoio governamental após incêndios (XXV-D, Comunidades): Média 1,53/7 (DP 1,12). Os gráficos de distribuição percentual das respostas por tema e perfil, impunidade e governança, são apresentados no corpo principal do trabalho, nas Figuras 33 a 36 da seção 2.9, por se considerar que sua leitura é mais útil junto à discussão dos resultados do que em apêndice.

Nota metodológica sobre o ambiente de análise

A análise do questionário combinou procedimentos descritivos e de organização de dados com suporte computacional baseado em modelos de linguagem de grande escala (LLMs), por meio do ambiente *Claude Code*. Esse suporte foi utilizado para a organização da base, a auditoria e a verificação de consistência dos dados, a automação de rotinas analíticas, a exploração dos resultados, a geração de tabelas e a conferência de consistência da base de dados. Os modelos de linguagem não substituíram os procedimentos estatísticos nem produziram inferências científicas autônomas. Todas as interpretações, decisões metodológicas e conclusões permaneceram sob responsabilidade do investigador.



APÊNDICE C:
MODELOS FORENSES, IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E PRODUÇÃO CIENTÍFICA DERIVADA

Este apêndice apresenta as especificações matemáticas e operacionais completas dos dois modelos forenses propostos no Capítulo 3 (seções 3.4 e 3.5). As notas metodológicas relativas às análises empíricas dos capítulos anteriores constam da seção 2.2.

C.1 MODELO 1, REML/BLUP: PREDIÇÃO ESPACIOTEMPORAL DE FOCOS

Aplicação: detecção de anomalias na ocorrência de focos de incêndio e priorização territorial para fiscalização e investigação criminal. Destinatários institucionais: brigadistas, agentes ambientais (IBAMA), Polícia Federal, Ministério Público.

Origem e desenvolvimento. O modelo foi desenvolvido pelo autor em conjunto com Sandro Sponchiado, no contexto da perícia ambiental e da previsão de incêndios florestais, abrangendo a concepção, a implementação, o aperfeiçoamento metodológico e a validação. A proposta foi apresentada em duas etapas: um resumo estendido no InterForensics 2025 (Sponchiado; Perazzoni, 2025) e um artigo desenvolvido nos Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias, COBREAP (Sponchiado; Perazzoni; Magliano, 2025).

Equação:

$$\mathbf{y = X\beta + Zu + \varepsilon}$$

onde: y = vetor de focos observados por unidade espacial--temporal; Xβ = efeitos fixos climáticos e ambientais (temperatura,



umidade, NDVI, uso do solo); Zu = efeitos aleatórios espaciais e territoriais; ε = erro idiossincrático.

Estimação: máxima verossimilhança restrita (REML). Predição: melhor predição linear não viesada (BLUP). Base metodológica: a abordagem REML/BLUP, consagrada no sistema SELEGEN-REML/BLUP (Resende, 2007) e tradicionalmente utilizada em melhoramento genético animal e vegetal, foi adaptada neste trabalho à análise espaciotemporal de focos de incêndio e implementada computacionalmente em Python.

Variáveis preditoras: temperatura média mensal (INMET), umidade relativa média (INMET), NDVI normalizado (MODIS), histórico de incêndios (INPE, 2025a; janela de cinco anos), tipo de uso e cobertura do solo (PRODES [INPE, 2025c] e MapBiomas – Coleção 10).

Saída operacional: mapa de priorização, para cada polígono territorial, valor preditivo BLUP comparado com observação. Desvios significativos (resíduos padronizados $|z| > 2{,}0$) sinalizam anomalias passíveis de origem antrópica deliberada e justificam priorização investigativa.

C.2 MODELO 2, PAINEL COM EFEITOS FIXOS: ESTIMAÇÃO DA CARGA SANITÁRIA ATRIBUÍVEL ÀS QUEIMADAS

Aplicação: estimação quantitativa do impacto das queimadas sobre desfechos de saúde, com base em comparação temporal município-por-município. Destinatários institucionais: gestores de saúde pública (Ministério da Saúde, Secretarias Estaduais e Municipais), Ministério Público, autoridades de fiscalização ambiental, juízos cíveis para fins de responsabilização sob o princípio do poluidor-pagador.

Origem e desenvolvimento. O modelo de painel com efeitos fixos foi desenvolvido originalmente pelo autor no contexto desta



pesquisa, para a análise dos impactos sanitários dos incêndios florestais, com colaboração técnica de Sandro Sponchiado na revisão metodológica, na discussão econométrica e na validação. Os resultados foram apresentados *no 24th Triennial Meeting of the International Association of Forensic Sciences* (IAFS 2026), em Sofia, na trilha *Human Rights and Technology* e na área *Fire Forensics*, e estão a ser consolidados em manuscrito científico para publicação posterior (Perazzoni *et al.*, 2026).

Equação:

$$\ln[E(Y(i,t))] = \alpha(i) + \gamma(t) + \Sigma\beta k \cdot Focos(i,t-k) + \Sigma\lambda k \cdot PM2.5(i,t-k) + \Sigma\theta k \cdot ÁreaQueimada(i,t-k) + \delta \cdot X(i,t) + \ln(Pop(i,t))$$

onde: Y(i,t) = número de internações no município i no período t, modelado como contagem; α(i) = efeitos fixos de município, que absorvem todas as características permanentes não observadas (qualidade do sistema de saúde local, perfil socioeconômico e epidemiológico estrutural, densidade demográfica de base); γ(t) = efeitos fixos de ano-mês, que capturam choques comuns a todos os municípios em cada período (sazonalidade nacional, epidemias, pandemia); βk, λk e θk = coeficientes que medem, em escala logarítmica, o efeito de cada exposição ambiental (focos, PM2.5 e área queimada, padronizadas) com defasagem de k meses; X(i,t) = vetor de controles climáticos variantes no tempo (temperatura e precipitação); ln(Pop(i,t)) = termo de exposição populacional (*offset*). Os coeficientes são reportados como razões de taxas de incidência, IRR = exp(coeficiente), por aumento de um desvio-padrão na exposição.

Estimador: Poisson por pseudomáxima verossimilhança (PPML), apropriado para dados de contagem, com efeitos fixos de município e de ano-mês. Erros-padrão: robustos, clusterizados por município. Resultados expressos como IRR por aumento de um desvio-padrão na exposição, com defasagens de zero a três meses. As



extensões previstas na maturação do modelo (seção 3.5.1) incluem a adoção de defasagens distribuídas polinomiais (Almon, 1965) sobre horizontes mais longos, a seleção de defasagens ótimas por critério de informação e a projeção do custo atribuível por município, etapas que exigem dados de maior granularidade.

Dados de entrada: Y(i,t), DATASUS SIH-SUS/SIA-SUS, nove categorias diagnósticas CID-10, contagem mensal por município. Focos(i,t), INPE (2025a). PM2.5(i,t), CAMS/Copernicus ECMWF. ÁreaQueimada(i,t), MapBiomas Fogo – Coleção 4. Defasagens: $k \in \{0,1,2,3\}$ meses. Período: jan/2019–dez/2024 (72 meses por município). Unidade: município-mês.

Saída operacional: para cada categoria diagnóstica e defasagem, estimativa do incremento esperado em internações associado a aumentos marginais de exposição ambiental, com intervalos de confiança a 95%. A diferença entre internações observadas e o cenário contrafactual de exposição reduzida fornece a estimativa de carga sanitária atribuível.

Fundamento empírico da escolha das variáveis de exposição. A inclusão simultânea do PM2.5 e da área queimada como variáveis de exposição, em vez da adoção de um único indicador, decorre de achado exploratório obtido durante a pesquisa. Em análise de correlações entre três variáveis ambientais e nove categorias diagnósticas do DATASUS (nível estadual-mensal, 2019–2024), o PM2.5, em leitura bivariada, apresentou desempenho diferenciado por região: na Amazônia Legal, a correlação média do PM2.5 com os desfechos de saúde foi de apenas 0,089, substancialmente inferior à da área queimada (0,341) e à dos focos de incêndio (0,298); no restante do Brasil, o PM2.5 recuperou desempenho comparável (0,312). Esse padrão fundamenta o uso da área queimada e dos focos como indicadores primários na Amazônia, preservando o PM2.5 para assegurar a aplicabilidade do modelo a outras regiões (Cerrado, Pantanal); no painel



municipal, de resto, o próprio PM2.5 revelou-se o preditor do efeito cardiovascular na Amazônia (seção 2.4.2).

Hipótese explicativa do desempenho do PM2.5 na Amazônia. A diferença regional é compatível com limitações conhecidas dos produtos de PM2.5 em ambiente tropical úmido, que a reanálise herda dos dados de satélite que assimila: a elevada umidade relativa interfere nas propriedades óticas das partículas; a cobertura de nuvens pode comprometer até 60% das observações satelitais em regiões tropicais; e a escassez de estações meteorológicas terrestres dificulta a calibração dos algoritmos de conversão (van Donkelaar *et al.*, 2010). Essas hipóteses não foram testadas diretamente e constituem agenda de pesquisa futura. Se confirmada por estudos com estações *in situ*, a constatação tem implicações para todos os sistemas de monitoramento de saúde baseados em PM2.5 por satélite em regiões tropicais úmidas.

Mecanismos ecológicos de latência. A literatura sugere que parte dos agravos associáveis ao fogo, como zoonoses e acidentes com animais peçonhentos, poderia manifestar-se com defasagem maior, por mecanismos ecológicos de supressão de predadores naturais e migração de fauna após a destruição de habitat (Keesing *et al.*, 2010). Cabe registrar, contudo, que o painel municipal com efeitos fixos desta pesquisa não confirmou tais associações: uma vez controladas a sazonalidade e as variáveis climáticas, os indicadores de fogo não apresentaram efeito positivo robusto sobre essas categorias, o que sugere que a coincidência sazonal observada decorre, em boa parte, do ciclo climático comum. A hipótese ecológica permanece, assim, plausível, mas não demonstrada, exigindo desenhos específicos para ser testada.

Estatuto da proposta. A formalização metodológica completa do modelo, incluindo a fundamentação das escolhas de *design* e a documentação das fontes de dados, foi sistematizada em proposta específica (Perazzoni *et al.*, 2026). Como reconhece essa proposta,



as correlações que fundamentaram as escolhas são exploratórias e bivariadas, calculadas no nível estadual-mensal, sem controle de confundidores; indicam padrões consistentes com o efeito esperado das queimadas sobre a saúde, mas não estabelecem causalidade. A calibração empírica do modelo, a definição da estrutura de defasagens por categoria diagnóstica e a validação dos resultados constituem as etapas subsequentes, a desenvolver no protótipo *Tatatinga*.

C.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS

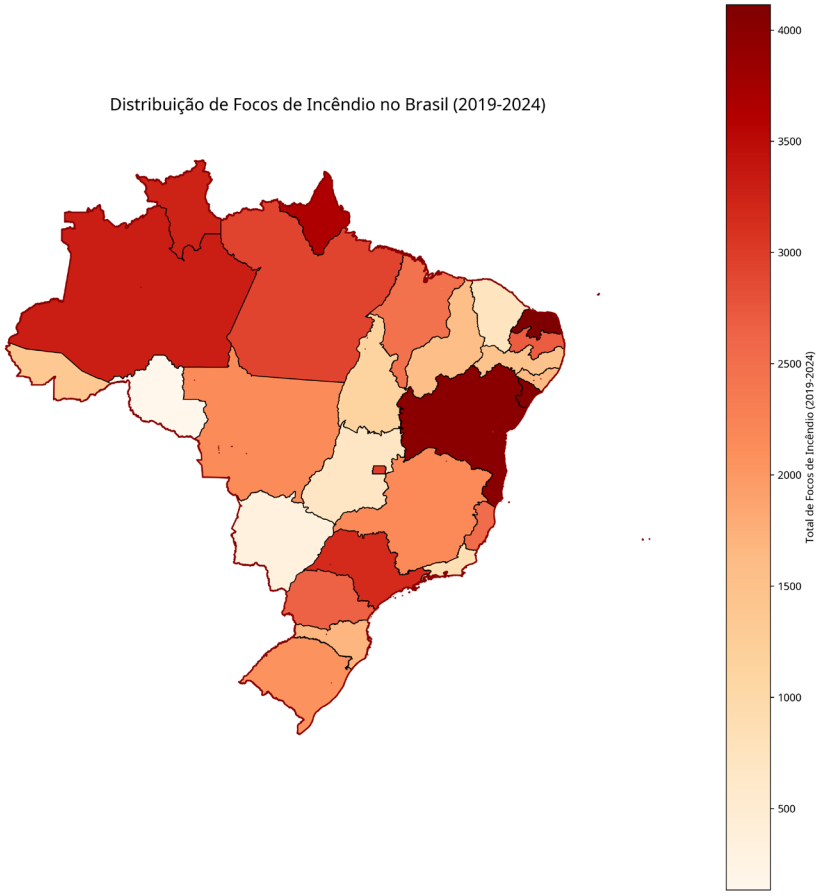
Implementação computacional. A formulação dos dois modelos foi desenvolvida em ambiente Python. O REML/BLUP apoia-se no sistema SELEGEN-REML/BLUP (Resende, 2007), originalmente concebido para o melhoramento genético e aqui adaptado, em caráter de proposta, à análise espaciotemporal de focos; o modelo de painel teve uma estimativa preliminar, em caráter de prova de conceito, conduzida com as bibliotecas statsmodels e linearmodels e erros-padrão robustos clusterizados por município (seção 2.4.2). Importa, contudo, registrar com precisão o estágio de maturidade desses modelos: a sua concepção foi apresentada em fóruns nacionais e internacionais, entre os quais o InterForensics 2025 (Sponchiado; Perazzoni, 2025) e o IAFS 2026 (Perazzoni *et al.*, 2026), e em produção científica publicada (Sponchiado; Perazzoni; Magliano, 2025), mas a sua implementação plena, com calibração definitiva, validação e operação rotineira, permanece pendente do desenvolvimento integral do protótipo *Tatatinga* e da obtenção da totalidade dos dados. Trata-se, portanto, de contribuições em estágio de proposta, e não de sistemas já implantados.



APÊNDICE D:
MAPAS EXPLORATÓRIOS COMPLEMENTARES

Este apêndice reúne quatro mapas coropléticos, em nível de unidade federativa, elaborados na fase exploratória da pesquisa. Têm caráter ilustrativo e complementar: oferecem uma leitura visual de conjunto da distribuição espacial dos focos de incêndio, da área queimada, da concentração média de PM2.5 à superfície e da incidência de internações respiratórias no território nacional, entre 2019 e 2024. Os valores consolidados e as análises inferenciais que sustentam as conclusões do trabalho encontram-se nos Capítulos 1 e 2 e nos Apêndices A e C.

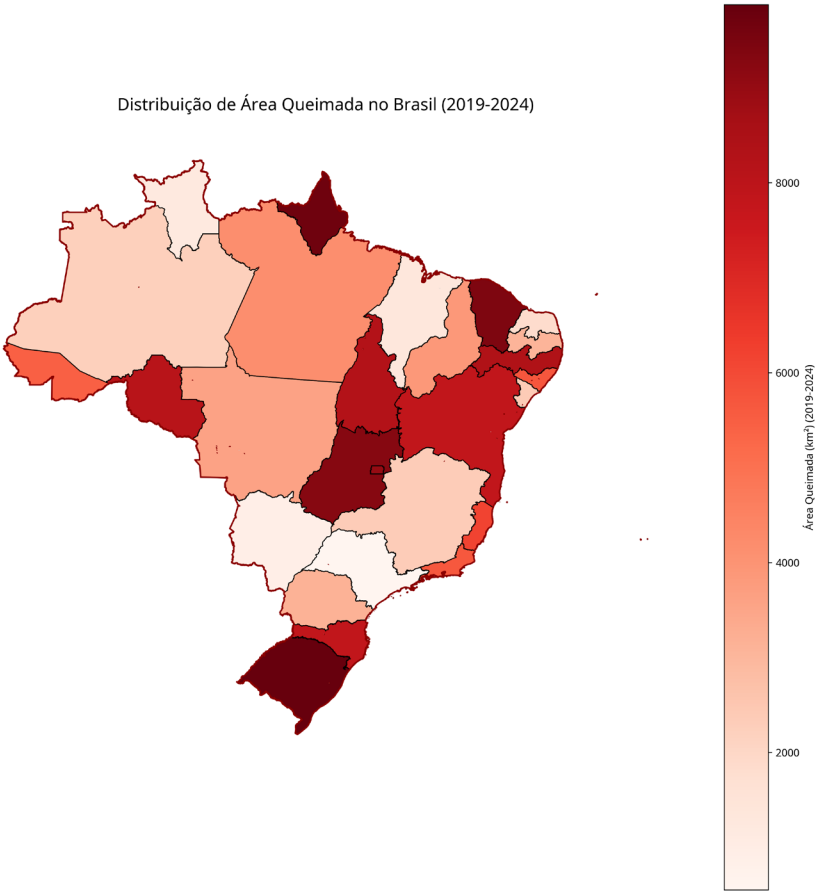
Figura D.1 – Distribuição espacial dos focos de incêndio por unidade federativa (2019–2024)



Fonte: INPE (2025a). Elaboração própria.

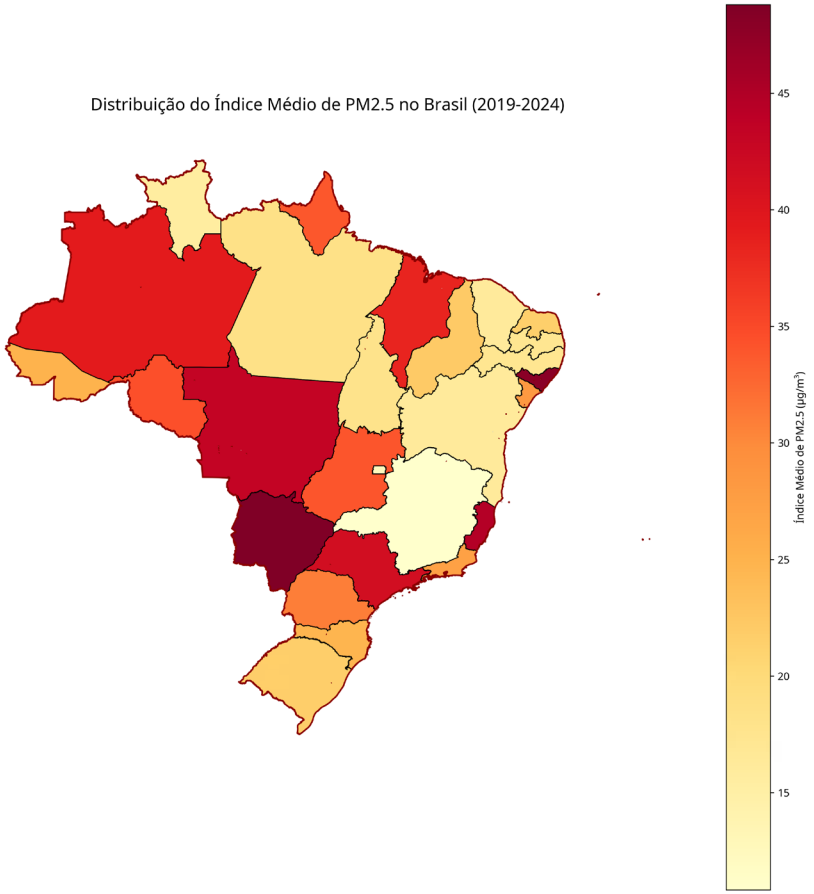
Nota: Leitura exploratória de conjunto: as tonalidades mais escuras indicam maior número de focos detectados; a escala de cores é gerada automaticamente e tem finalidade ilustrativa, não substituindo os totais nacionais consolidados apresentados no Capítulo 1.

Figura D.2 – Distribuição espacial da área queimada por unidade federativa (2019–2024), em leitura exploratória de conjunto



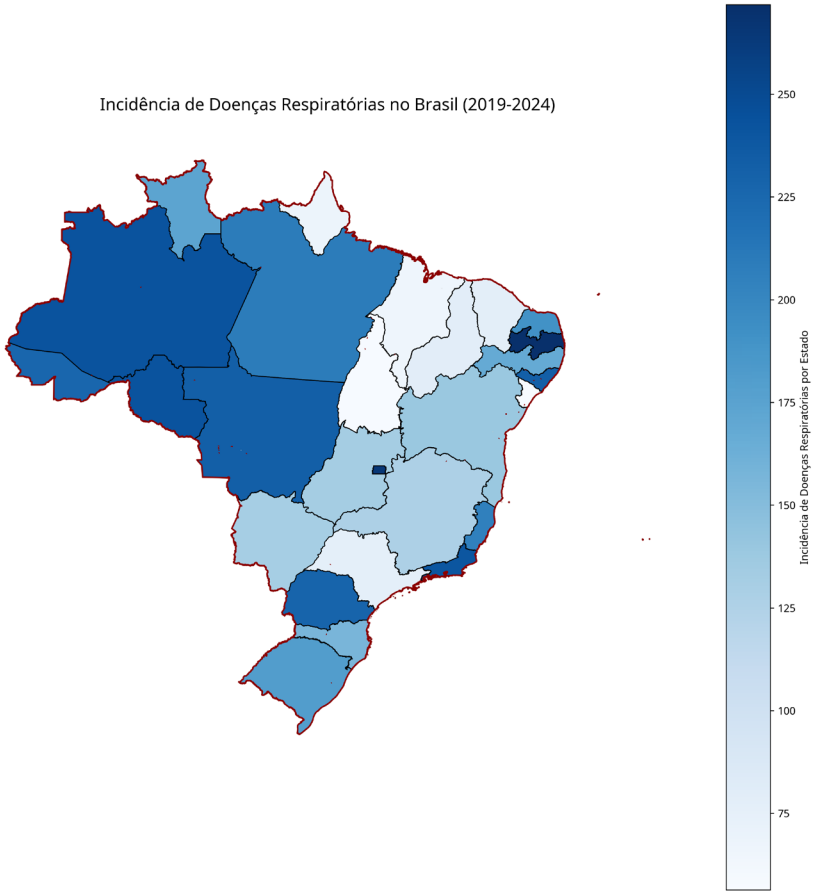
Fonte: MapBiomas Fogo (Coleção 4). Elaboração própria.

Figura D.3 – Distribuição espacial da concentração média de PM2.5 à superfície por unidade federativa (2019–2024), em µg/m³



Fonte: Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS/ECMWF), reanálise EAC4. Elaboração própria.

Figura D.4 – Distribuição espacial da incidência de internações por doenças respiratórias por unidade federativa (2019–2024)



Fonte: DATASUS (SIH-SUS). Elaboração própria.



APÊNDICE E:
GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

Este glossário reúne, em ordem alfabética e em linguagem simples elaborada pelo próprio autor, os principais termos técnicos das áreas de estatística, sensoriamento remoto, saúde pública, direito e cadeia produtiva utilizados ao longo do trabalho, bem como os sistemas, órgãos e instrumentos mencionados. As siglas em inglês são apresentadas pelo nome original, seguido da sigla, da tradução e da explicação. As definições são introdutórias e não substituem as fontes especializadas; a expansão de todas as siglas consta também da Lista de Abreviaturas e Siglas, no início do volume.

Advocacia-Geral da União (AGU). Órgão que representa judicialmente a União e atuou na cobrança de responsabilização por danos ambientais.

Agravo (à saúde). Termo da saúde pública para qualquer problema ou dano à saúde (doença, lesão, transtorno) que motive atendimento ou internação.

Área queimada. Extensão de território (em km² ou hectares) efetivamente atingida pelo fogo num período, medida por satélite. Diferente do foco de calor, que indica apenas onde houve fogo, não o tamanho da área. Em Portugal, emprega-se área ardida no mesmo sentido.

Arguição de Descumprimento de Preceito Fundamental (ADPF). Ação levada ao STF para questionar atos do poder público que violem preceitos fundamentais da Constituição.

Autocorrelação. Situação em que os valores de uma série ao longo do tempo ou do espaço dependem dos vizinhos — por exemplo, um mês de muito fogo tende a vir após outro



de muito fogo. Precisa ser tratada para não distorcer os testes estatísticos.

Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas). Banco de dados público do INPE que registra diariamente, por satélite, os focos de calor (queimadas) em todo o país.

Best Linear Unbiased Prediction (BLUP). Em português, Melhor Predição Linear Não Enviesada. Técnica que estima o efeito próprio de cada unidade (cada município ou área) combinando os dados daquela unidade com o padrão geral, gerando previsões mais estáveis quando há poucos dados. É a base do modelo de detecção de anomalias de focos.

***Blockchain*.** Tecnologia de registro distribuído e imutável: as informações ficam encadeadas e não podem ser alteradas retroativamente, criando um histórico verificável e à prova de adulteração.

Boi na Linha. Protocolo de monitoramento da compra de gado (versão 2.0, de 2024), coordenado pelo Imaflora, que padroniza a verificação de se um fornecedor de boi está associado a desmatamento.

Brasil MAIS / RedeMAIS (Meio Ambiente Integrado e Seguro). Programa do Ministério da Justiça e Segurança Pública que, por meio da plataforma RedeMAIS, integra imagens diárias de satélite de alta resolução e alertas automáticos de desmatamento e queimadas para apoio à segurança pública.

Cadastro Ambiental Rural (CAR). Registro público nacional em que todo imóvel rural declara os seus limites georreferenciados e as suas áreas protegidas.



Capacidade instalada. Quantidade de recursos de saúde disponíveis numa região (leitos, equipamentos, equipes), independentemente de estarem ou não em uso.

Carga sanitária (atribuível). O total de adoecimentos (internações, atendimentos, mortes) que pode ser razoavelmente associado a uma causa específica — neste trabalho, às queimadas.

Casos atribuíveis / Fração atribuível. A parcela dos casos de doença que provavelmente não teria ocorrido sem a exposição ao fogo. A fração é essa parcela em percentual; os casos são o número absoluto correspondente.

Classificação Estatística Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde, 10ª revisão (CID-10). Código internacional padrão que identifica cada doença e permite extrair das bases de saúde grupos específicos, como internações respiratórias ou cardiovasculares.

Coeficiente (de regressão). Número estimado por um modelo que indica o tamanho e o sentido (positivo ou negativo) da relação entre um fator e o resultado analisado.

Coeficiente de determinação (R^2). Mede quanto da variação de um fenômeno o modelo consegue explicar, de 0 a 1 (ou 0% a 100%). Um R^2 baixo indica que muita coisa permanece sem explicação.

***Commodities*.** Produtos primários negociados em larga escala no mercado internacional, como carne bovina, soja, café e madeira.

Continuidade de combustível. Ausência de interrupções na vegetação capaz de arder, o que permite ao fogo propagar-se sem barreiras por grandes extensões. É agravada pelo abandono agrícola e pela falta de gestão da paisagem.



Contrafactual. O cenário hipotético do que teria acontecido na ausência da causa investigada (por exemplo, quantas internações haveria sem as queimadas). É a base de toda estimativa de efeito.

Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Em português, Serviço de Monitoramento da Atmosfera do Programa Copernicus (União Europeia). Fornece estimativas globais de poluentes atmosféricos, como o PM2.5, por reanálise — combinando satélite e modelos. Foi a fonte dos dados de poluição usados na pesquisa.

Corte raso. Remoção total da vegetação de uma área (desmatamento completo), por oposição à degradação parcial da floresta. É o que o sistema PRODES mede.

Custo atribuível. A parcela do gasto total (aqui, internações do SUS) que pode ser associada à exposição ao fogo. É a tradução financeira dos casos atribuíveis.

Dano ambiental. Lesão ao meio ambiente juridicamente relevante, que pode gerar dever de reparação e responsabilização de quem o causou.

***Datum* e projeção cartográfica.** Referências técnicas que definem como a superfície curva da Terra é representada num mapa plano e como as coordenadas são calculadas. Bases precisam usar o mesmo datum para serem cruzadas corretamente.

Declaração das Nações Unidas sobre os Direitos dos Povos Indígenas (DNUDPI). Declaração da ONU, de 2007, que reconhece os direitos dos povos indígenas, inclusive a relação com as terras que tradicionalmente ocupam.

Defasagem (*lag*). O intervalo de tempo entre uma causa e o seu efeito — por exemplo, entre o pico de queimadas e o



aumento de internações semanas depois. Os modelos testam vários *lags* para captar efeitos que não são imediatos.

Densidade demográfica. Número de habitantes por unidade de área (em geral, por km^2). Ajuda a interpretar a oferta de serviços per capita.

Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). Departamento do Ministério da Saúde responsável pelos sistemas de informação e bases de dados públicas do SUS.

Desvio-padrão. Medida de quanto os valores de um conjunto se afastam, em média, do seu valor médio. Um aumento por desvio-padrão de PM2.5 significa um aumento de poluição do tamanho dessa dispersão típica.

Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER). Sistema do INPE que emite alertas quase diários de desmatamento e degradação para orientar a fiscalização — com função de alerta rápido, não de medição oficial das taxas.

Diligência devida (*due diligence*). Conjunto de verificações que uma empresa deve fazer para garantir que o seu produto não está ligado a desmatamento ilegal. É a obrigação central imposta pelo EUDR. No direito internacional, designa também o dever de o Estado adotar as medidas adequadas para prevenir danos ambientais, inclusive para além das suas fronteiras.

Discriminação indireta. Quando uma regra ou estrutura, mesmo sem intenção de discriminar, produz na prática efeito desigual sobre um grupo vulnerável. Aqui: concentrar a falta de serviços de saúde justamente nas regiões de maior risco ambiental.



Distrito Sanitário Especial Indígena (DSEI). Unidade regional que organiza e gere o atendimento de saúde indígena num território determinado.

Dupla diferença (*double-difference*). Método que mede o efeito de uma política comparando a diferença entre antes e depois e entre quem foi e quem não foi afetado, ajudando a isolar o efeito real da política de outras tendências.

Ecologia do fogo. Conjunto de relações entre o fogo e um ecossistema. Em biomas adaptados, como as savanas, o fogo recorrente integra o ciclo natural e as espécies desenvolveram defesas contra ele. Em biomas sensíveis, como a floresta amazônica e a Mata Atlântica, o fogo atua como agente de degradação, e não de renovação.

Ecoinovação. Inovação tecnológica, jurídica ou organizacional voltada à sustentabilidade. A ecoinovação jurídica é a transformação das próprias estruturas do direito para enfrentar a crise ecológica.

Efeito Bruxelas. Capacidade da União Europeia de influenciar práticas em outros países pela via do acesso ao seu mercado: quem quer exportar para a UE precisa adotar as suas regras.

Efeitos aleatórios. Em modelos estatísticos, forma de tratar as diferenças entre unidades (municípios, áreas) como amostras de uma população maior, emprestando força entre elas. É a base do BLUP.

Efeitos fixos. Técnica que neutraliza tudo o que é característica fixa de cada município e de cada período, comparando cada lugar consigo mesmo ao longo do tempo e isolando o efeito do fogo de diferenças permanentes entre regiões.



Enforcement. Termo inglês para a aplicação efetiva da lei: a capacidade de fiscalizar e punir o descumprimento, e não apenas de prever a regra no papel.

***European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (*ECMWF*).** Em português, Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo. Instituição europeia que opera o serviço CAMS, fonte dos dados atmosféricos de PM2.5 utilizados.

***European Union Deforestation Regulation* (*EUDR*).** Em português, Regulamento da União Europeia contra o Desmatamento. Exige que *commodities* exportadas à UE (carne, soja, café, madeira, cacau) comprovem não estar ligadas a desmatamento ou degradação após 31 de dezembro de 2020.

Externalidade. Custo (ou benefício) de uma atividade que recai sobre terceiros que não participam dela — por exemplo, o custo sanitário das queimadas pago pelo SUS e pela população, e não por quem ateia o fogo.

Foco de calor (ou foco de incêndio). Ponto onde o satélite detecta fogo ativo na superfície. Indica onde e quando há queimada, mas não o tamanho da área atingida.

Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI). Órgão federal responsável pela política indigenista e pela proteção das terras indígenas.

Georreferenciamento. Atribuição de coordenadas geográficas precisas a um imóvel, polígono ou evento, permitindo localizá-lo no mapa e cruzá-lo com outras bases de dados.

Grilagem. Apropriação ilegal de terras públicas, em geral acompanhada de desmatamento e queimada para limpar a área e simular uso produtivo.



Guia de Trânsito Animal (GTA). Documento que acompanha o transporte de animais entre propriedades, rastreando lotes — e não cada animal individualmente.

Hermenêutica. A técnica de interpretar normas jurídicas. A hermenêutica territorializada interpreta o direito levando em conta as desigualdades concretas do território.

Imaflora. Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola: organização que atua em certificação socioambiental e no monitoramento de cadeias agropecuárias, e que coordena o protocolo Boi na Linha.

Incendiarismo doloso. Ateamento intencional de fogo, com o propósito de produzir o incêndio. Distingue-se dos comportamentos negligentes, em que o fogo resulta de atividade humana que não pretendia causá-lo, como a queima de resíduos ou o uso de máquinas.

Incêndio florestal. Fogo que se propaga sem controle sobre vegetação (floresta, savana, pastagem ou área em regeneração), independentemente de a origem ser natural, acidental ou intencional. No uso corrente, e em várias das fontes citadas nesta obra, a expressão designa de forma ampla o fogo na vegetação; quando a distinção importa, o texto assinala se se trata de fogo controlado (manejo tradicional, fogo prescrito, queima autorizada) ou de fogo fora de controle. Em Portugal, emprega-se também fogo florestal ou fogo rural.

Incidence Rate Ratio (IRR). Em português, Razão de Taxas de Incidência. Mede quanto a taxa de doença muda quando a exposição aumenta. Um valor de 1,25 significa 25% a mais de casos; abaixo de 1, menos casos. É o principal resultado do modelo de painel.



Incidência. Número de casos novos de uma doença num período e numa população. Diferente da prevalência, que conta todos os casos existentes.

Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Indicador que resume, num número de 0 a 1, as condições de saúde, educação e renda de uma população; quanto mais alto, melhor.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Órgão oficial de estatística e geografia do Brasil, responsável por censos, estimativas de população e dados da pecuária.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Principal órgão federal de fiscalização e licenciamento ambiental.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Instituto de pesquisa brasileiro responsável pelo monitoramento ambiental por satélite, incluindo queimadas (BDQueimadas) e desmatamento (PRODES).

Intervalo de confiança. Faixa de valores dentro da qual provavelmente está o resultado verdadeiro. Se a faixa não inclui o ponto de nenhum efeito, o resultado é considerado estatisticamente significativo.

Justa causa. Base mínima de indícios que justifica a abertura de uma investigação ou de uma ação penal.

Justiça ambiental. Campo que estuda a distribuição desigual dos danos ambientais, que tendem a recair sobre os mais pobres e vulneráveis.

Justiça distributiva. Princípio sobre como benefícios e ônus devem ser repartidos numa sociedade. Aqui: quem lucra com a atividade que gera o fogo não é quem arca com os seus custos sanitários.



Leito de UTI. Vaga hospitalar equipada para cuidados intensivos. Sua disponibilidade por habitante é um indicador-chave de capacidade do sistema de saúde.

Limiar (*threshold*). Valor de corte a partir do qual algo passa a ser considerado relevante — por exemplo, a temperatura mínima que o satélite usa para classificar um ponto como foco de calor.

Litigância climática. Ações judiciais que invocam obrigações climáticas do Estado ou de empresas, com frequência fundadas em direitos humanos. Cresceu de forma acelerada na última década, embora a maior parte tramite perante cortes nacionais.

MapBiomas. Rede colaborativa de universidades, ONGs e empresas que mapeia, a partir de imagens de satélite, o uso e a cobertura da terra e as áreas queimadas no Brasil ao longo das décadas.

Material particulado fino (PM2.5). Partículas suspensas no ar com até 2,5 micrômetros — pequenas o bastante para penetrar fundo nos pulmões e na corrente sanguínea. É o principal poluente nocivo da fumaça das queimadas.

Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Ministério responsável pela política agropecuária, incluindo a rastreabilidade do rebanho (SISBOV).

***Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (*MODIS*).** Em português, Espectrorradiômetro de Imagens de Resolução Moderada. Sensor a bordo de satélites da NASA que capta imagens da superfície terrestre, usado no monitoramento ambiental e de queimadas.

Morbidade. Ocorrência de doenças numa população (quem adoece), por contraste com mortalidade (quem morre).



***National Aeronautics and Space Administration* (*NASA*).** Em português, Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (Estados Unidos). Agência espacial norte-americana que opera satélites de observação da Terra, como os que portam o sensor MODIS.

***Normalized Difference Vegetation Index* (*NDVI*).** Em português, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. Indicador calculado por satélite que mede o vigor e a densidade da vegetação. Útil para acompanhar a cobertura vegetal e o seu estresse.

Nexo causal. Ligação demonstrável de causa e efeito entre uma conduta e um dano — requisito central para responsabilizar alguém juridicamente.

***Offset* (em modelos estatísticos).** Ajuste que faz o modelo contar casos em relação ao tamanho da população, de modo a comparar lugares com populações diferentes de forma justa (taxas, e não números absolutos).

***One Health* (Saúde Única).** Abordagem que entende a saúde humana, a animal e a ambiental como interligadas e inseparáveis.

Opinião consultiva. Pronunciamento de tribunal internacional sobre a interpretação do direito, emitido a pedido de Estados ou de organismos, sem julgar caso concreto. Não condena ninguém, mas fixa o sentido das obrigações e costuma orientar decisões posteriores.

Organização Internacional do Trabalho (OIT). Agência da ONU voltada ao mundo do trabalho; a sua Convenção n.º 169 protege os direitos dos povos indígenas e tribais.



Organização Mundial da Saúde (OMS). Agência da ONU para a saúde, que define, entre outros, parâmetros de referência como o mínimo de leitos de UTI por habitante.

p-valor / significância estatística (p). Em português, valor de p. Medida da probabilidade de um resultado ter surgido por acaso. Quanto menor (em geral abaixo de 0,05), mais forte a evidência de que o efeito é real.

Pacto Internacional sobre Direitos Econômicos, Sociais e Culturais (PIDESC). Tratado internacional de 1966 que reconhece direitos sociais, entre eles o direito à saúde (artigo 12).

Painel (dados em painel). Base de dados que acompanha as mesmas unidades (aqui, municípios) ao longo de vários períodos. Permite análises mais robustas do que um retrato de um único momento.

Percentil. Posição de um valor numa distribuição ordenada: o percentil 90, por exemplo, é o ponto abaixo do qual estão 90% dos casos.

Perdas e danos (*loss and damage*). Agenda do regime climático internacional voltada aos prejuízos que já não podem ser evitados nem pela redução de emissões nem pela adaptação. Envolve reconhecimento, reparação e financiamento aos mais atingidos.

Perícia (ambiental/forense). Exame técnico-científico que produz prova para um processo, estabelecendo, por exemplo, a origem e a extensão de um dano ambiental.

Piroceno. Termo proposto para designar a época atual, em que o fogo, e não mais o controle humano sobre ele, se torna a principal força de transformação das paisagens. O domínio das chamas tornou possível o antropoceno; a perda desse domínio define o momento seguinte.



Poisson (regressão de). Modelo estatístico apropriado para analisar contagens (número de internações, de focos), usado para estimar o efeito do fogo sobre os adoecimentos.

Polígono (em SIG). Em mapas digitais, a figura que delimita uma área — uma propriedade, uma terra indígena, uma cicatriz de queimada.

Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF). Política instituída pela Lei n.º 14.944/2024, que integra a gestão do fogo e reconhece o uso tradicional e o fogo prescrito como práticas legítimas.

Poluidor-pagador (princípio do). Princípio segundo o qual quem causa o dano ambiental deve arcar com os seus custos, em vez de transferi-los à sociedade.

Precaução (princípio da). Diante de risco de dano grave ou irreversível, a falta de certeza científica plena não deve servir de pretexto para adiar medidas de proteção.

Prevenção (princípio da). Dever de evitar danos ambientais já conhecidos e previsíveis, diferentemente da precaução, que lida com riscos ainda incertos.

Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Legal por Satélite (PRODES). Sistema do INPE que mede, por interpretação de imagens de satélite, as taxas anuais de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal desde 1988.

***Proxy*.** Indicador indireto usado para medir algo que não se consegue medir diretamente. Exemplo: o PM2.5 de satélite como *proxy* da exposição à fumaça.

Queimada. Uso do fogo sobre a vegetação, em geral associado ao preparo de área para agricultura ou pecuária, à



renovação de pasto ou à limpeza de resíduos. Pode ser legal e controlada, quando autorizada e conduzida segundo regras técnicas, ou ilegal e descontrolada, quando escapa à área pretendida e se converte em incêndio. No Brasil, o termo é também usado de forma genérica para o fogo na vegetação — inclusive nas bases de dados oficiais, como o BDQueimadas do INPE, que registra focos de calor sem distinguir a origem ou a licitude do fogo.

Rastreabilidade. Capacidade de seguir o caminho de um produto (aqui, o boi) da origem ao destino, identificando por onde passou.

Reanálise atmosférica. Reconstrução de variáveis do ambiente (como o PM2.5) combinando observações de satélite com modelos de computador, oferecendo cobertura completa mesmo onde faltam estações de medição.

***Restricted Maximum Likelihood* (*REML*).** Em português, Máxima Verossimilhança Restrita. Método estatístico que estima a variabilidade nos dados de forma menos enviesada (verossimilhança é o quão provável é observar os dados sob o modelo). Usado em conjunto com o BLUP no modelo de focos.

Reparação (do dano). Obrigação de compensar ou restaurar o que foi lesado; no dano ambiental, pode ser a recuperação da área ou a indenização correspondente.

Resolução espacial. O tamanho do pixel de um dado de satélite: quanto menor, mais detalhe. Uma resolução grossa (por exemplo, 80 km) borra fenômenos locais como plumas de fumaça.

Robustez (de um resultado). Propriedade de um achado que se mantém mesmo quando se mudam premissas, controles ou métodos. Um resultado robusto é mais confiável.



Sazonalidade. Padrão que se repete ao longo do ano (estações). No fogo amazônico, concentra-se na estação seca; os modelos a removem para não confundir o efeito do fogo com o da época do ano.

Secretaria Especial de Saúde Indígena (SESAI). Órgão do Ministério da Saúde responsável pela saúde indígena, que coordena os DSEI e o SasiSUS.

Sensoriamento remoto. Obtenção de informações sobre a superfície terrestre à distância, por satélites ou aeronaves — imagens, focos de calor, índices de vegetação.

Série temporal. Sequência de medições de uma mesma variável ao longo do tempo, por exemplo os focos de incêndio mês a mês.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB). Órgão gestor do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e das florestas públicas federais.

***Shapefile*.** Formato de arquivo muito usado em mapas digitais para guardar a geometria (pontos, linhas, polígonos) e os atributos de feições geográficas.

Sistema Brasileiro de Identificação e Certificação de Origem Bovina e Bubalina (SISBOV). Sistema oficial de rastreabilidade do rebanho que identifica cada animal e os imóveis por onde passou; de adesão voluntária, é voltado sobretudo à exportação.

Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF). Sistema que armazena e certifica os limites georreferenciados dos imóveis rurais.

Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH-SUS). Base do DATASUS que registra as internações pagas pelo SUS, com diagnóstico, procedimento e custo.



Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR). Sistema que opera e integra, em âmbito nacional, os dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR).

Sistema Único de Saúde (SUS). Sistema público e universal de saúde do Brasil, que atende toda a população gratuitamente.

Subsistema de Atenção à Saúde Indígena (SasiSUS). Parte do SUS dedicada especificamente à atenção à saúde dos povos indígenas.

Supremo Tribunal Federal (STF). Mais alta corte do Brasil e guardiã da Constituição; julga, por exemplo, as ADPF ambientais citadas no trabalho.

*Tatatinga***.** Nome dado à plataforma (protótipo de painel online) desenvolvida nesta pesquisa, que integra dados de focos, poluição e saúde para mapear o risco das queimadas. A palavra vem do tupi-guarani — tata (fogo, fumaça) e tinga (branca), ou seja, fumaça branca — em alusão à fumaça que cobre a Amazônia nos meses de seca.

Termo de Ajustamento de Conduta (TAC). Acordo jurídico em que quem causou ou pode causar dano (aqui, frigoríficos) se compromete a corrigir condutas e cumprir exigências, com força de título executivo, evitando ou encerrando um processo.

Tokenização. Representação de um bem do mundo real (aqui, o boi) por um registro digital único (*token*) em *blockchain*, o que permite identificá-lo, rastreá-lo e até usá-lo como garantia em operações de crédito.

Triangulação (de gado). Manobra de lavagem em que o boi criado em área irregular passa por fazendas legais intermediárias para mascarar a sua origem antes do abate.



Variável de controle. Fator incluído no modelo para que o seu efeito não se confunda com o do fogo (por exemplo, temperatura e umidade), isolando melhor a relação de interesse.

Viés (*bias*). Erro sistemático que distorce um resultado numa direção. Diferentemente do erro aleatório, não desaparece aumentando a amostra: precisa ser corrigido no desenho do estudo.

Vulnerabilidade social. Conjunto de condições (baixa renda, pouca infraestrutura, isolamento) que reduz a capacidade de um grupo de se proteger e de se recuperar diante de um dano.

***Web3*.** Conjunto de tecnologias de internet baseadas em registros descentralizados (como o *blockchain*), em que dados e ativos podem ser verificados e controlados sem depender de uma autoridade central.

Zoonose / doença vetorial. Zoonose é a doença transmitida entre animais e seres humanos; doença vetorial é a transmitida por um vetor, como mosquito ou carrapato. Ambas são sensíveis a mudanças ambientais como o desmatamento.



NOTA SOBRE O USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Na elaboração desta obra, o autor recorreu a ferramentas baseadas em modelos de linguagem de grande escala (LLMs) como apoio às seguintes tarefas: programação e implementação computacional dos modelos; organização, auditoria e verificação de consistência de dados; automação de rotinas analíticas; análise do questionário estruturado; revisão linguística e editorial; normalização bibliográfica; estruturação de sumários; e desenvolvimento e prototipagem do sistema *Tatatinga*.

O uso dessas ferramentas limitou-se a funções de apoio. A inteligência artificial não foi utilizada para produzir autonomamente resultados ou conclusões científicas, nem substituiu o julgamento acadêmico do investigador. Todas as decisões metodológicas, análises, interpretações e conclusões são da responsabilidade exclusiva do autor.



SOBRE O AUTOR

Franco Perazzoni

Delegado de Polícia Federal e professor voluntário do Núcleo de Estudos Amazônicos da Universidade de Brasília (NEAz/CEAM/UnB). Doutor em Sustentabilidade Social e Desenvolvimento pela Universidade Aberta de Lisboa (2021), é mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica pela Universidade Nova de Lisboa (2013) e em *Alta Dirección en Seguridad Internacional* pela Universidad Carlos III de Madrid (2022). Realizou pós-doutorados em Políticas Públicas, pela Escola Nacional de Administração Pública (Enap), e em Direitos Humanos, Saúde e Justiça, pelo *Ius Gentium Conimbrigae – Human Rights Centre* (IGC/CDH) e pelo *Portuguese Speaking Countries Observatory on Human Rights* (POSCOHR), na Universidade de Coimbra, sob orientação da Professora Doutora Alexandra Aragão.

Sua atuação situa-se na interseção entre Direito, novas tecnologias, ambiente e governança, com ênfase em questões amazônicas. Pesquisa sustentabilidade, políticas públicas, saúde e direitos humanos, com especial interesse nas relações entre território, sociedade e problemas socioambientais.

Lattes: http://lattes.cnpq.br/3027574581399092

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8775-4312

E-mail: franco.perazzoni@unb.br



SOBRE O PREFACIADOR

Manoel Pereira de Andrade

Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília e coordenador do Núcleo de Estudos Amazônicos da Universidade de Brasília (NEAz/CEAM/UnB). Graduado em Agronomia pela Universidade Federal de Mato Grosso, é mestre em Economia Agrária pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, e doutor em Economia Agrária e Sociologia Rural pelo Instituto Superior de Agronomia, da Universidade de Lisboa. Sua trajetória acadêmica está ligada aos Estudos Amazônicos e às questões agrárias, ambientais e territoriais, com atuação em ensino, pesquisa e extensão. À frente do NEAz, atua na formação interdisciplinar e na aproximação entre Universidade, instituições, movimentos sociais, territórios e populações amazônicas. Autor do livro *Amazônia: história, economia e território*.



SOBRE O POSFACIADOR

Miguel Costa

Assessor Executivo e Consultor em Educação e Direitos Humanos do Observatório de Direitos Humanos nos Países de Língua Oficial Portuguesa (POSCOHR). Dedica-se à coordenação pedagógica, à formação avançada e à articulação entre Direitos Humanos, Saúde e Direito, com foco na cidadania, ética e não discriminação. Colabora com o Centro de Direitos Humanos / Ius Gentium Conimbrigae e é Vogal da Mesa da Assembleia Geral do POSCOHR.



ÍNDICE REMISSIVO

A

Amazônia Legal 16, 23, 26, 36, 39, 47, 52, 57, 59, 61, 64, 65, 68, 69, 71, 74, 80, 88, 93, 94, 96, 99, 101, 102, 104, 105, 106, 108, 114

área queimada 33, 39, 41, 44, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 66, 86, 87, 88, 93, 94, 96, 99, 100, 102, 103, 127, 128, 134, 156, 168, 182, 185, 200, 207, 208

B

BDQueimadas 14, 39, 76, 86, 140, 156, 158, 161, 199, 237, 244, 249

C

Cadastro Ambiental Rural (CAR) 237, 250, 251

calendário sanitário 39, 88, 95, 96, 97, 187, 211

carga sanitária 34, 120, 133, 137, 155, 165, 170, 226, 228, 238

- casos atribuíveis 120, 121, 238, 239
- custo atribuível 121, 122, 124, 125, 126, 127, 166, 188, 228, 239

cegueira institucional recíproca 34, 129, 137, 166, 185

Código Florestal 54, 55, 139, 140, 196

comunidades tradicionais 10, 23, 28, 30, 40, 51, 106, 111, 129, 146, 154, 173, 184, 214, 219, 223

criminalidade ambiental 50, 78, 145, 161, 200, 203

D

desmatamento 14, 16, 24, 34, 37, 39, 42, 47, 50, 53, 55, 57, 59, 60, 61, 62, 63

direito à saúde 27, 33, 37, 38, 57, 70, 78, 85, 105, 110, 119, 120, 134, 136, 139, 146, 152, 155, 178, 183, 184, 186, 187, 188, 247

direito constitucional amazônico 145

direitos humanos 9, 13, 15, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 35, 38, 48, 54, 57, 62, 63, 70, 73, 77, 84, 119, 124, 133, 134, 136

discriminação indireta 120, 183, 240

doenças cardiovasculares 23, 87, 96, 99, 101, 103, 115, 170, 181

doenças infecciosas 91, 93, 133, 170, 210

doenças oculares 87, 96, 101

doenças respiratórias 69, 77, 91, 94, 97, 102, 123, 170, 171, 215, 236

E

Efeito Bruxelas 149, 241

efeitos fixos 14, 34, 35, 39, 40, 88, 89, 94, 95, 100, 104, 120, 121, 164, 165, 166, 175, 181, 184, 186, 211, 226, 227, 229, 241

European Union Deforestation Regulation (EUDR) 147, 242

F

focos de incêndio 27, 33, 38, 39, 40, 44, 49, 50, 51, 52, 57, 58, 67, 68, 75, 76, 78, 79, 88, 93, 96, 99, 101, 105, 108, 111, 116, 117, 118, 156, 163, 168, 169, 170, 172, 174

fogo prescrito 44, 243, 248

fronteira agropecuária 32, 48, 49, 59, 63, 66, 78, 83, 112, 136, 143, 180, 199

G

gastos hospitalares 122, 123, 127

geointeligência 157, 158, 159

georreferenciamento 56, 144, 153, 161, 187, 218, 242

governança ambiental 50, 81, 144, 150

grilagem 37, 55, 60, 62, 66, 74, 140, 141, 167, 179, 199, 211, 242

I

impacto agudo 95, 102, 171, 181

impunidade 24, 55, 56, 128, 130, 132, 139, 141, 173, 177, 179, 222, 223, 224

incêndios florestais 10, 23, 25, 31, 33, 34, 35, 38, 44, 46, 49, 51, 80, 133, 135, 136, 144, 145, 177, 179, 188, 190, 191, 196, 197, 205, 214, 216, 217, 221, 225, 227

- crise de 2024 42, 52, 53
- impactos sanitários 33, 36, 39, 123, 129, 132, 133, 145, 184, 211, 227
- respostas institucionais 33, 35, 132, 154, 162, 177, 179, 186, 189

infraestrutura hospitalar 42, 83, 104, 170, 186

injustiça ambiental 184

integração de bases 137, 156, 160, 162, 187

interoperabilidade 160, 161



J

justiça ambiental 23, 27, 33, 38, 69, 81, 173, 194, 244

justiça distributiva 70, 244

M

manejo tradicional 44, 51, 140, 142, 155, 243

MapBiomas 15, 33, 39, 50, 51, 52, 53, 64, 68, 86, 88, 94, 98, 99, 100, 156, 158, 168, 176, 199, 200, 208

material particulado fino (PM2.5) 85, 86, 93, 101, 157, 245

modelos forenses 42, 137, 155, 177, 184, 187, 225

- modelo de painel com efeitos fixos 35, 39, 88, 89, 95, 100, 165, 211, 227
- modelo REML/BLUP 34, 163, 164, 186

monitoramento por satélite 137, 156, 204

N

nexo causal 127, 157, 161, 187, 246

O

One Health 42, 83, 84, 85, 97, 175, 202, 246

P

pecuária extensiva 60, 67, 69, 173, 175, 179

perdas e danos 188, 247

Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (PNMIF) 51, 55, 139, 196, 248

poluição atmosférica 49, 87, 123

povos indígenas 10, 14, 23, 28, 30, 39, 48, 51, 62, 77, 111, 146, 154, 168, 198, 202, 211, 239, 242, 247, 251

princípio da precaução 63, 139, 140, 149, 150, 185, 195

princípio do poluidor-pagador 70, 122, 124, 144, 149, 150, 165, 167, 187, 226

PRODES 16, 61, 66, 148, 151, 156, 158, 161, 199, 209, 226, 239, 244, 248

Q

queimadas 14, 24, 27, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 48, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67

R

rastreabilidade 42, 54, 137, 144, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 156, 159, 160, 161, 162, 177, 184, 187, 195, 198, 218, 245, 249, 250

- rastreabilidade pecuária 137, 156, 159, 161
- rastreabilidade produtiva 184, 187

responsabilização 28, 29, 32, 34, 35, 37, 42, 47, 55, 56, 95, 122, 130, 132, 135, 136, 137, 138, 139, 143, 144, 145, 150, 152, 159, 161, 163, 165, 167, 176, 177, 178, 180

- responsabilização ambiental 144, 150
- responsabilização civil 161, 165, 167
- responsabilização jurídica 37, 163

S

saúde indígena 16, 27, 38, 39, 40, 89, 115, 116, 117, 134, 183, 186, 188, 192, 201, 210, 241, 250, 251

saúde pública 23, 27, 35, 38, 134, 165, 176, 178, 185, 187, 190, 192, 198, 226, 236

sazonalidade 39, 48, 78, 79, 88, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 102, 106, 113, 114, 120, 121, 125, 133, 181, 211, 227, 229, 250

sensoriamento remoto 43, 157, 161, 184, 218, 236, 250

Sistema Brasileiro de Identificação e Certificação de Origem Bovina e Bubalina (SISBOV) 54, 250

Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH-SUS) 122, 250

Sistema Único de Saúde 14, 16, 36, 39, 87, 209, 240, 251

T

Tatatinga 9, 10, 29, 34, 40, 42, 128, 137, 139, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 178, 186, 192, 230, 251

Terras Indígenas 36, 39, 40, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 113, 115, 116, 117, 118, 170, 174, 175, 183, 186, 198, 211, 212, 242

territórios quilombolas 39, 74, 76, 78, 174, 198, 211

tríade estrutural 42, 57, 63, 64

tríplice vulnerabilidade amazônica 84, 111, 114, 133

- vulnerabilidade ambiental 111
- vulnerabilidade sanitária 34, 82, 111, 175
- vulnerabilidade social 112, 136, 252

U

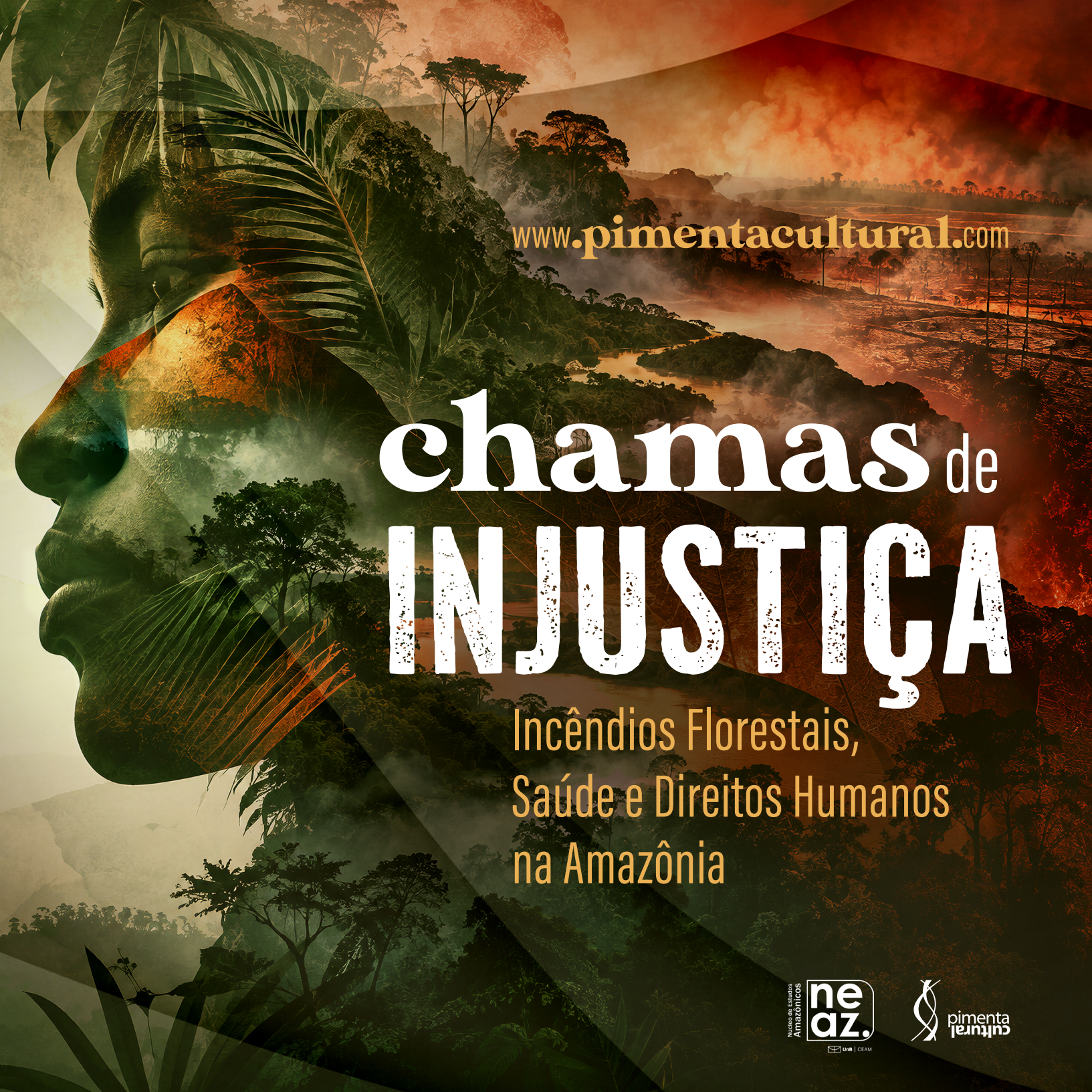
uso tradicional do fogo 51, 142

V

vigilância epidemiológica 85, 134, 187

Z

zoonoses 87, 91, 92, 93, 100, 102, 104, 133, 170, 172, 175, 210, 229


www.pimentacultural.com
chamas de
INJUSTIÇA
Incêndios Florestais,
Saúde e Direitos Humanos
na Amazônia
Núcleo de Estudos Amazônicos
neaz.
UniB | CEAM
pimenta cultural