

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Bruna Soares Guimarães

**DESMATAMENTO NAS FLORESTAS PÚBLICAS NÃO DESTINADAS DA
AMAZÔNIA LEGAL: dinâmica, determinantes espaciais e impactos futuros**

Belo Horizonte

2023

Bruna Soares Guimarães

**DESMATAMENTO NAS FLORESTAS PÚBLICAS NÃO DESTINADAS DA
AMAZÔNIA LEGAL: dinâmica, determinantes espaciais e impactos futuros**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Britaldo Silveira Soares Filho

Belo Horizonte

2023

G963d
2023

Guimarães, Bruna Soares.

Desmatamento nas florestas públicas não destinadas da Amazônia Legal [manuscrito] : dinâmica, determinantes espaciais e impactos futuros / Bruna Soares Guimarães. – 2023.

54 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Análise, Modelagem e Gestão de Sistemas Ambientais.

Bibliografia: 51-54.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Desmatamento – Amazônia Legal – Teses. 3. Florestas – Amazônia Legal – Teses. 4. Interfaces (Computador) – Teses. I. Soares-Filho, Britaldo Silveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(81)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

DESMATAMENTO NAS FLORESTAS PÚBLICAS NÃO DESTINADAS DA AMAZÔNIA LEGAL: DINÂMICA, DETERMINANTES ESPACIAIS E IMPACTOS FUTUROS

BRUNA SOARES GUIMARÃES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Britaldo Silveira Soares Filho - UFMG - (Doutor)

Argemiro Teixeira Leite Filho - UFMG - (Doutor)

Sônia Maria Carvalho Ribeiro - UFMG - (Doutora)

Paulo Moutinho - IPAM - (Doutor)

Belo Horizonte, 08 de maio de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Britaldo Silveira Soares Filho, Membro**, em 12/05/2023, às 14:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Argemiro Teixeira Leite Filho, Usuário Externo**, em 12/05/2023, às 22:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sônia Maria Carvalho Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 18/05/2023, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto de Souza Moutinho, Usuário Externo**, em 30/05/2023, às 21:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2300654** e o código CRC **AEECC0AD4**.

*Dedico esse trabalho aos meus pais Flávio e Fábila.
Pelo amor, pelo carinho e pelo apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Não foi uma caminhada fácil, de caminhos bem delineados e planos. Finalizar um mestrado em uma das melhores universidades do Brasil é motivo de muita honra e orgulho, mas também de muito agradecimento a todos que me apoiaram e tornaram possível encarar esse desafio.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Flávio e Fábia, ao meu irmão Arthur e à minha cunhada Julinha. Por todo amor, apoio incondicional e por sempre acreditarem no meu potencial. Agradeço à Lud, minha namorada, pelo cuidado, parceria e incentivo nas horas mais difíceis. Não teria chegado até aqui se não fosse por vocês.

Agradeço aos meus amigos, que se mantiveram presentes mesmo com minhas ausências durante esse tempo e foram meu porto-seguro. Em especial, Amandinha, Flávio, Helô e Lalá.

Agradeço ao orientador Prof. Britaldo, pelos aprendizados, pela paciência e pela oportunidade. Ao coorientador Argemiro, pelo apoio constante e parceria. Sinto-me extremamente honrada por ter contado com o conhecimento e a experiência de vocês.

Agradeço aos meus colegas do PPG-AMSA por todos os aprendizados compartilhados, principalmente à Adri, Ana, Cacau e Érica, a quem também agradeço pelo companheirismo. Agradeço aos professores do Programa e da UFMG, por enriquecerem meu caminho com tanto conhecimento e à equipe do CSR pelo acolhimento. Agradeço aos programas de fomento à pesquisa por viabilizarem a valorização da ciência no país.

Agradeço aos meus colegas da WayCarbon, pela parceria e por tornarem viável realizar esse mestrado mesmo me dedicando à jornada CLT. Agradeço por terem despertado em mim o tema de Mudanças Climáticas, que se tornou um propósito em minha vida.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais, por permitir meu desenvolvimento profissional e pessoal por mais esses dois anos. Agradeço também à sociedade e a todos que tornam possível a existência de uma educação pública, gratuita e de qualidade.

O encerramento desse ciclo é uma conquista nossa. Obrigada!

“Tenho tão nítido o Brasil que pode ser, e há de ser,
que me dói o Brasil que é.”

- *Darcy Ribeiro* -

RESUMO

As Florestas Públicas Não Destinadas (FPND) abrigam 30% do desmatamento da Amazônia Legal. Áreas não designadas e sem domínio específico, são consideradas altamente expostas a atividades ilegais, como grilagem e exploração ilegal de madeira. Apesar da sua relevância e vulnerabilidade, há poucos estudos que compreendem e projetam o desmatamento nas FPND usando modelos espaciais, ferramentas relevantes para compreensão da dinâmica do desmatamento. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é de verificar a relevância das FPND no desmatamento histórico da Amazônia Legal, analisar os determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e comparar com a área em que está inserida (no caso, a Amazônia Legal), projetar o desmatamento nessas áreas para o futuro e calcular as emissões de gases de efeito estufa potencial. Para isso, através do *software* Dinamica EGO, foi realizada modelagem espacialmente explícita em que foi identificado o comportamento dos coeficientes dos pesos dos determinantes espaciais analisados das FPND e da Amazônia Legal. Verificou-se que o comportamento dos pesos nas duas regiões é similar, mas os determinantes espaciais de natureza antrópica apresentaram maiores valores de coeficiente do peso nas FPND do que na Amazônia Legal, uma evidência da maior exposição das FPND a atividades ilegais. O modelo apresentou validação de 26%, superior a um modelo aleatório. O cenário tendencial identificado indica que o desmatamento das FPND, que em 2020 abrangia 6% das FPND, pode chegar a 10% dessas áreas até 2030. As FPND podem ser responsáveis pela emissão de mais de 150 milhões de tCO₂e por ano até 2050, superior as emissões atuais do setor industrial. Os resultados apontam que as políticas públicas atuais não são suficientes para proteção dessas áreas. As FPND apresentam grande relevância no desmatamento da Amazônia Legal e a contenção de atividades ilegais podem apoiar de maneira considerável o atingimento dos compromissos e metas atuais do país de conservação do bioma amazônico.

Palavras-chave: desmatamento; Florestas Públicas Não Destinadas; modelagem espacial; DinamicaEGO.

ABSTRACT

Untitled public forestlands (UPF) account for 30% of deforestation in the Legal Amazon. Areas that are not designated or under specific ownership are considered highly exposed to illegal activities such as land grabbing and illegal logging. Despite their relevance and vulnerability, there are few studies that understand and project deforestation in UPF using spatial models, which are relevant tools for understanding deforestation dynamics. Thus, the objective of this work is to verify the relevance of UPF in the historical deforestation of the Legal Amazon, analyze the spatial determinants of deforestation in UPF and compare them with the area in which they are located (in this case, the Legal Amazon), project deforestation in these areas for the future and calculate the potential greenhouse gas emissions. To this end, spatially explicit modeling was performed using the Dinamica EGO software, which identified the behavior of the coefficient weights of the spatial determinants analyzed in UPF and the Legal Amazon. It was found that the behavior of the weights in the two regions is similar, but the anthropogenic spatial determinants had higher weight coefficient values in UPF than in the Legal Amazon, evidence of the greater exposure of UPF to illegal activities. The model had a validation of 26%, superior to a random model. The trend scenario identified indicates that deforestation of UPF, which covered 6% of UPF in 2020, may reach 10% of these areas by 2030. UPF may be responsible for emitting more than 150 million tCO_{2e} per year until 2050, higher than the current emissions of the industrial sector. The results indicate that current public policies are not sufficient to protect these areas. UPF have great relevance in the deforestation of the Legal Amazon, and the containment of illegal activities can significantly support the achievement of current commitments and goals of the country for the conservation of the Legal Amazon.

Keywords: deforestation; Untitled public forestlands; spatial modeling; DinamicaEGO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura das etapas metodológicas do estudo	23
Figura 2 - Localização das Florestas Públicas Não Destinadas na Amazônia Legal	24
Figura 3 - Mapas dos determinantes espaciais utilizados na modelagem espacial ..	27
Figura 4 - Evolução histórica do desmatamento nas Florestas Públicas Não Destinadas	35
Figura 5 - Distribuição do desmatamento nas Florestas Públicas Não Destinadas por estado	35
Figura 6 - Comparação dos pesos dos determinantes espaciais nas Florestas Públicas Não Destinadas e na Amazônia Legal.....	37
Figura 7 - Mapas de desmatamento em 2020.....	39
Figura 8 – Comparação da validação do modelo do peso de evidências e do modelo nulo	40
Figura 9 - Projeção do desmatamento acumulado nas Florestas Públicas Não Destinadas	40
Figura 10 - Mapas da projeção do desmatamento acumulado até 2030 e 2040.....	41
Figura 11 - Desmatamento projetado entre 2020 e 2028 nas Florestas Públicas Não Destinadas por estado	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área ocupada por florestas públicas nos biomas brasileiros.....	14
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Determinantes espaciais selecionados para análise do Peso de Evidências.....	25
Quadro 2 - Limiares de valor dos métodos que indicam correlação.....	29
Quadro 3 - Resultado dos testes de correlação Índice de Cramer.....	30
Quadro 4 - Resultado dos testes de correlação Teste de Contingência.....	30
Quadro 5 - Métricas da paisagem do desmatamento entre 2014 e 2020.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Desmatamento no Brasil.....	12
1.2	As Florestas Públicas Não Destinadas	13
1.3	Os compromissos na redução do desmatamento no Brasil	15
1.4	Arcabouço Legislativo.....	15
1.5	Modelagem espacial do desmatamento.....	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos Gerais	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	ARTIGO.....	18
3.1	INTRODUÇÃO	21
3.2	DADOS E MÉTODOS	22
3.2.1	Região de estudo	23
3.2.2	Dados.....	24
3.2.3	Análise histórica do desmatamento nas FPND	27
3.2.4	Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND	27
3.2.5	Comparação dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal.....	30
3.2.6	Simulação.....	31
3.2.7	Validação.....	32
3.2.8	Projeções futuras.....	33
3.2.9	Emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND	33
3.3	RESULTADOS	34
3.3.1	Análise histórica do desmatamento nas FPND	34
3.3.2	Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND	36
3.3.3	Comparação dos coeficientes dos pesos dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal	38
3.3.4	Simulação.....	39
3.3.5	Validação.....	39
3.3.6	Projeções futuras.....	40
3.3.7	Emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND	42
3.4	DISCUSSÃO	42
3.4.1	Análise histórica do desmatamento nas FPND	42
3.4.2	Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND	43

3.4.3	Comparação dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal.....	43
3.4.4	Projeções futuras e emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND	43
3.5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS.....	46
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Desmatamento no Brasil

No Brasil, o desmatamento é a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa do Brasil (SEEG, 2022). O país, detentor da maior floresta tropical do mundo, o bioma amazônico, apresenta um papel relevante nas reduções das emissões de gases de efeito estufa através da contenção do desmatamento na região Amazônica. Para além dos impactos associados às mudanças do clima devido ao grande estoque de carbono florestal, o bioma também apresenta grande relevância quanto às suas funções ecossistêmicas, como a ocorrência do desmatamento também é prejudicial à biodiversidade, aos regimes de chuvas e à qualidade do solo (LEITE-FILHO et al., 2021; PACHECO e MEYER, 2022).

Por deter grande estoque de carbono florestal, apresentar uma extensa quantidade de espécies da fauna e da flora e ser essencial para controle do regime de chuvas de extensa região, o avanço do desmatamento pode implicar em consequências irreversíveis à integridade da floresta. Este ponto de não-retorno, também denominado como “*tipping point*”, em que o desmatamento da Amazônia implicaria em consequências suficientes que impediria a regeneração da própria floresta, está cada vez mais próximo (LOVEJOY e NOBRE, 2019).

Os dados mais recentes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicam que houve um aumento significativo no desmatamento na Amazônia Legal em 2020. Entre 2019 e 2020, houve desmatamento de 11.088 km² entre agosto de 2019 e julho de 2020, um aumento de 9,5% em relação ao período anterior (2018-2019), que registrou 10.129 km² de desmatamento (INPE, 2022). Esse foi o maior índice de desmatamento desde 2008 e representa uma grave ameaça à biodiversidade e aos ecossistemas da região, bem como às comunidades locais e ao clima global.

O desmatamento no Brasil ocorre de maneiras diferentes de acordo com a categorização fundiária e o instrumento de gestão ao qual a área está sob controle. Estudos recentes evidenciam que as áreas protegidas no país apresentam desmatamento quatro vezes inferior às demais áreas de florestas, independente do bioma em que estão localizadas (GONÇALVES-SOUSA et al, 2021). Apenas 1% do desmatamento dos últimos 30 anos ocorreu em Terras Indígenas (TI), que ocupam

13,6% do território nacional (AZEVEDO et al, 2021). As Florestas Públicas Não Destinadas (FPND), áreas públicas que não apresentam dominialidade e nem designação específica, são as principais áreas públicas sujeitas a desmatamento, representando até 30% do desmatamento na Amazônia Legal (MOUTINHO e AZEVEDO-RAMOS, 2023). Em 2019, as FPND também foram responsáveis por 21% da área atingida por incêndios florestais, o que são indicadores de alta ocorrência de atividades ilegais, como grilagem e desmatamento ilegal (ALENCAR et al, 2020).

1.2 As Florestas Públicas Não Destinadas

As FPND, também nomeadas como Florestas Públicas do Tipo B, são florestas que estão em áreas do Poder Público, mas que ainda não foram destinadas para algum tipo de domínio (SFB, 2020). As FPND podem ser administradas pela esfera federal ou estadual.

As FPND ocupam uma área de 63 milhões de hectares, segundo o Serviço Florestal Brasileiro (2020), que seria equivalente a 7,4% do território do Brasil. Há divergências quanto ao tamanho dessa área, devido à existência de sobreposições com outras áreas públicas, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas. Essa divergência pode ser provocada pela falta de atualização da designação das FPND para instrumentos de gestão, divergências na espacialização dos seus limites territoriais ou falta de atualização do Cadastro Nacional de Florestas Públicas (AZEVEDO-RAMOS et al, 2020).

Entre as FPND existentes, cerca de 96% estão localizadas no bioma amazônico e o restante distribuído principalmente no Cerrado e na Caatinga. A Amazônia Legal, divisão sociopolítica dos estados que apresentam remanescentes do bioma amazônico, é constituída em 60% pela floresta amazônica e pelos biomas cerrado, caatinga e pantanal. A Amazônia Legal contempla 99,6% das FPND brasileiras (SFB, 2020). Na Tabela 1 é detalhada a localização das FPND por bioma e em comparação com as Florestas Públicas Destinadas.

Tabela 1 - Área ocupada por florestas públicas nos biomas brasileiros

Bioma	Florestas públicas destinadas (área em ha)	Florestas públicas não destinadas (área em ha)	Total (área em ha)
Amazônia	223.507.570	60.703.071	284.210.641
Caatinga	2.890.558	210.996	3.101.554
Cerrado	14.924.018	2.184.922	17.108.940
Mata Atlântica	3.715.052	2.56	3.717.612
Pampa	285.994	8	286.002
Pantanal	902.107	109.729	1.011.836
Total	246.225.299	63.211.286	309.436.585

Fonte: Adaptado de SFB (2020)

Nas FPND, a falta de titulação é vista como oportunidade para realização de atividades ilegais nessas áreas (AZEVEDO et al, 2021). Atualmente, mais de 20% das FPND estão irregularmente registradas como propriedades privadas no Cadastro Ambiental Rural (CAR), o que se configura como grilagem (AZEVEDO-RAMOS et al, 2020).

A grilagem é uma atividade ilegal que data a ocorrência ao menos desde 1850 e que influenciou na categorização fundiária do Brasil (OLIVEIRA, 2020). Identifica-se uma associação direta com a ocorrência da grilagem e o desmatamento, considerando que 66% do desmatamento ocorrido nas FPND foram em áreas que estão erroneamente declaradas como particular no CAR (IPAM, 2019). O CAR é um cadastro autorregulatório realizado para regularização de imóveis rurais e sua utilização para apropriação indevida de terras públicas se configura como grilagem. A

ocorrência dessas atividades é favorecida pela lentidão dos órgãos ambientais para validação do CAR (MOUTINHO e AZEVEDO-RAMOS, 2023).

1.3 Os compromissos na redução do desmatamento no Brasil

A crescente preocupação e engajamento sobre a agenda climática e defesa da biodiversidade têm aumentado a pressão para posicionamento dos países na proteção aos seus biomas. O Acordo de Paris, tratado assinado por 195 países na COP 21 (Conferência das Partes) com objetivo de promover um compromisso global na redução das emissões de GEE, é o mais atualizado quanto às metas de cada país na redução de suas emissões. O objetivo mundial é conter o aumento da temperatura média global em, no máximo, 1,5°C em comparação com a média pré-industrial até o fim do século XXI (UNFCCC, 2022).

Para isso, o Acordo estabelece que cada país deve definir sua própria meta e apresentá-la no documento denominado Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês). Essas metas devem ser atualizadas em intervalos de cinco anos, com objetivo de serem mais audaciosas do que as anteriores. A versão mais recente da NDC brasileira, publicada no ano de 2022, estabelece as metas de redução de emissão de GEE em 37% até 2025 e redução de 50% até 2030, ambos considerando 2005 como ano-base. Entre as estratégias descritas para cumprir com essas metas, há menção de acabar com o desmatamento ilegal corrente no país até o ano de 2028 (UNFCCC, 2022). A inação governamental frente a meta adotada em compromisso assinado por 195 países pode fragilizar relações econômicas e institucionais com outros países, principalmente ao considerar a relevância e o desafio da agenda climática mundialmente.

1.4 Arcabouço Legislativo

A destinação de terras públicas é vista como uma das soluções para contenção da grilagem e a Lei de Gestão de Florestas Públicas, Lei 11.824/2006 (BRASIL, 2006), estabelece que essas terras devem ser designadas para uma categoria fundiária de proteção, mantendo-se públicas (ALENCAR et al, 2019). Neste âmbito, entende-se que as áreas públicas devem ser destinadas a áreas protegidas ou para fins de reforma agrária e, entre os critérios de destinação, prioriza-se os critérios ambientais

frente aos agrários. Dessa forma, caso ocupada por povos tradicionais, essas áreas devem ser destinadas dentro do processo de demarcação para Terras Indígenas ou Quilombolas. Caso não seja, mas se caracterize dentro do âmbito da Lei do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), Lei 9.985/2000, deverá ser destinada para Unidades de Conservação (ARAUJO et al, 2006).

Do ponto de vista climático, as FPND também apresentam suporte da contenção do desmatamento através da Política Nacional sobre Mudança do Clima (subscrita na Lei 12.187/2009), que identifica como um de seus instrumentos os Planos de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento nos biomas (BRASIL, 2019).

Em contrapartida aos compromissos descritos em acordos multilaterais e respaldos nas ferramentas jurídicas nacionais para contenção do desmatamento ilegal, no ano de 2020 foi encaminhado dentro dos trâmites dos representantes legislativos a aprovação do Projeto de Lei (PL) 2.633 (BRASIL, 2020), conhecida como “PL da Grilagem” por propiciar condições mais benéficas a legalização de terras que foram invadidas através da grilagem (OLIVEIRA, 2020). Dessa forma, percebe-se que apesar de fundamentalmente as FPND apresentarem um aparato legislativo que possa direcionar sua designação ou controle do desmatamento, essas áreas estão expostas a retrocessos que possam ser coniventes com a ocorrência de atividades ilegais.

1.5 Modelagem espacial do desmatamento

Para adoção de ações e medidas que possam conter o avanço do desmatamento, analisar as mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo é fundamental. A modelagem é importante instrumento de planejamento e de gestão territorial. O seu uso possibilita avaliações *ex-post*, para compreensão das variáveis que influenciam na alocação do desmatamento, e avaliações *ex-ante*, quando há possibilidade de antecipar os impactos a partir da elaboração de cenários futuros (CHRISTOFOLETTI, 1999). Apesar da alta exposição a atividades ilegais e da relevância das FPND no desmatamento da Amazônia Legal, identifica-se poucos estudos sobre o comportamento do desmatamento nessas áreas.

Para compreender a influência de características espaciais no desmatamento, pode-se utilizar modelos espacialmente explícitos, como como Peso de Evidências, que tem como objetivo prever a alocação do desmatamento com base em determinantes espaciais (SOARES-FILHO et al, 2013). É um método bayesiano de compreensão da relação empírica das variáveis analisadas e as transições identificadas na área analisada (RIBEIRO et al., 2021).

O uso de modelos espaciais apresenta grande relevância para compreensão de mecanismos causais e entendimento dos processos de evolução da paisagem (RIBEIRO et al, 2021). A relevância das FPND para o desmatamento da Amazônia Legal indica a importância do aprofundamento sobre as dinâmicas de transição dessa região e os possíveis impactos caso o cenário tendencial atual seja mantido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Compreender a dinâmica de evolução do desmatamento das FPND e os seus mecanismos causais.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Analisar a participação histórica das FPND no desmatamento da Amazônia Legal, com recorte por estado;
- Identificar a influência dos determinantes espaciais (favorabilidade ou repulsa) no desmatamento das FPND;
- Comparar o comportamento dos determinantes espaciais das FPND com o da Amazônia Legal, para identificar possíveis especificidades dessas áreas;
- Realizar projeção futura do desmatamento para avaliar cenário tendencial de desmatamento;
- Calcular potencial de emissões de GEE do desmatamentos das FPND e comparar com os compromissos atuais do Brasil.

3 ARTIGO

DESMATAMENTO NAS FLORESTAS PÚBLICAS NÃO DESTINADAS DA
AMAZÔNIA LEGAL: DINAMICA, DETERMINANTES ESPACIAIS E IMPACTOS
FUTUROS

Artigo em submissão

RESUMO

As Florestas Públicas Não Destinadas (FPND) representam 30% do desmatamento que ocorre na Amazônia Legal brasileira. Essas áreas públicas são especialmente suscetíveis a ações ilegais, como a exploração de madeira e a grilagem, com alta relevância para a contenção do desmatamento, especialmente no bioma amazônico, onde mais de 96% dessas florestas estão localizadas. Apesar disso, há poucos estudos que compreendem e projetam o desmatamento nas FPND usando modelos espaciais. Este estudo teve como objetivo verificar a contribuição histórica do desmatamento das FPND, entender a influência dos determinantes espaciais no desmatamento e suas diferenças em relação à Amazônia Legal, estimar o cenário tendencial de desmatamento e calcular as emissões de gases de efeito estufa dessas áreas. Os resultados indicaram um aumento na participação das FPND no desmatamento total da Amazônia Legal, com maior relevância dessas áreas nos estados do Amazonas e Pará. Os coeficientes dos pesos dos determinantes espaciais analisados têm comportamento semelhante aos da Amazônia Legal, mas aqueles de natureza antrópica apresentaram valores mais altos nas FPND, o que pode indicar maior susceptibilidade a atividades ilegais. O estudo também identificou um potencial de desmatamento acumulado de 10% até 2030 e 14% até 2040, com os estados do Pará, Rondônia e Mato Grosso apresentando maior probabilidade de desmatamento das FPND entre 2020 e 2028. Até 2030, as FPND podem ser responsáveis pela emissão anual de 153 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), uma emissão de gases de efeito estufa superior à do setor industrial. Portanto, é essencial tomar medidas para proteger as FPND e combater a exploração ilegal de madeira e a grilagem para mitigar os impactos do desmatamento na Amazônia Legal.

Palavras-chave: Florestas Públicas Não Destinadas; desmatamento; Amazônia Legal; modelagem espacial.

ABSTRACT

Untitled public forestlands (UPF) represent 30% of the deforestation that occurs in Brazilian Legal Amazon. These public areas are especially susceptible to illegal actions, such as logging and land grabbing, which are highly relevant to curbing deforestation, especially in the Amazon biome, where more than 96% of these forests are located. Despite this, there are few studies that understand and project deforestation in the UPF using spatial models. This study aimed to verify the historical contribution of deforestation in the UPF, understand the influence of spatial determinants on deforestation and their differences in relation to Legal Amazon, estimate the trend scenario of deforestation and calculate greenhouse gas emissions from these areas. Results indicated an increase in participation of UPF in total deforestation of Legal Amazon, with greater relevance of these areas in the states of Amazonas and Pará. Weights of Evidence coefficients of analyzed spatial determinants have a similar behavior to those of Legal Amazon, but those of an anthropic nature showed higher values in UPF, which may indicate greater susceptibility to illegal activities. The study also identified a cumulative deforestation potential of 10% by 2030 and 14% by 2040, with states of Pará, Rondônia and Mato Grosso showing the highest probability of UPF deforestation between 2020 and 2028. By 2030, UPF may be responsible for the emission of 153 million tons of CO₂ equivalent (tCO₂e), an emission of greenhouse gases greater than that of the industrial sector. Therefore, it is essential to take measures to protect the UPF and combat illegal logging and land grabbing to mitigate impacts of deforestation in Legal Amazon.

Keywords:Untitled public forestlands; deforestation; Legal Amazon; spatial modelling.

3.1 INTRODUÇÃO

A destruição da Amazônia Brasileira apresentou um crescimento de 42% entre 2019 e 2021, alcançando um desmatamento superior a 13 mil km², maior valor desde 2006 (INPE, 2022). Neste cenário o Brasil caminha na contramão do compromisso de zerar o desmatamento ilegal até 2028, assumido na sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) (UNFCCC, 2022). Por deter grande estoque de carbono florestal, apresentar uma extensa quantidade de espécies da fauna e da flora e ser essencial para controle do regime de chuvas, este avanço do desmatamento da Amazônia, maior floresta tropical do mundo, implica em riscos à manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais às atividades antrópicas da região, como a conservação da biodiversidade, e regulação do regime de chuvas (LEITE-FILHO et al., 2021; PACHECO e MEYER, 2022). Neste mesmo período (2019-2021), cerca de 30% do desmatamento da Amazônia Legal ocorreu dentro das Florestas Públicas Não Destinadas (FPND) (MOUTINHO e AZEVEDO-RAMOS, 2023). As FPND são áreas públicas que não foram designadas para algum objetivo de uso ou proteção e não apresentam dominialidade específica como acontece nos casos das Unidades de Conservação e Terras Indígenas (SFB, 2022). Isso faz com que as FPND sejam as áreas públicas com maior incidência do desmatamento no bioma amazônico. A ausência de instrumentos de gestão é um fator impulsionador das atividades ilegais de uso e conversão do solo nessas áreas, principalmente a grilagem de terras (MOUTINHO et al, 2020; AZEVEDO et al, 2021).

Atualmente mais de 20% das FPND estão irregularmente registradas como propriedades privadas no Cadastro Ambiental Rural (CAR) (AZEVEDO-RAMOS et al., 2020). Não obstante, o aumento do desmatamento nas FPND é favorecido pela lentidão dos órgãos ambientais para validação do CAR (MOUTINHO e AZEVEDO-RAMOS, 2023). Além da inação dos órgãos ambientais, a grilagem de terra pode ser ainda fortalecida legalmente no Brasil, colocando as Florestas não destinadas em riscos de destruição ainda mais elevados. Tramita no Senado Brasileiro, o Projeto de Lei (PL) 2.633/2020 (BRASIL, 2020), conhecido como “PL da Grilagem”, que dispõe sobre a regularização fundiária de terras particulares que ocuparam áreas públicas até 2008. Além de ser vista como apropriação indevida de terras públicas, o PL da Grilagem se mostra tolerante com o desmatamento ilegal, já que inclui no processo de regularização propriedades já notificadas por desmatamento (BRITO, 2020;

ZENERATTI, 2021). Em suma, as Florestas Públicas Não Destinadas (FPND) estão se tornando cada vez mais vulneráveis à ocupação irregular e retirada de vegetação nativa.

Mesmo diante deste cenário, poucos estudos se concentraram em estudar o comportamento do desmatamento das FPND da Amazônia e determinar empiricamente os seus principais determinantes espaciais. Estudos recentes se debruçam sobre o alarmante quadro de risco ao qual as FPND estão submetidas na Amazônia (MOUTINHO e AZEVEDO-RAMOS, 2023; PACHECO e MEYER, 2022; AZEVEDO-RAMOS et al, 2020, KRUID et al, 2022), entretanto, ainda existe uma lacuna de aplicação de modelos computacionais espacialmente e temporalmente explícitos para entender e projetar a alocação do desmatamento e determinantes espaciais. O uso de modelos espacialmente explícitos é uma ferramenta valiosa para a identificação dos determinantes e padrões do desmatamento, fornecendo informações para a orientação de ações de fiscalização e proteção ambiental.

Diante deste contexto, o presente estudo tem como objetivo compreender o papel das FPND para o desmatamento na Amazônia Legal, analisar o efeito de diferentes determinantes espaciais do desmatamento nessas áreas em comparação aos determinantes da Amazônia Legal como um todo. Além disso, são projetados cenários tendenciais futuros de desmatamento e calculado os potenciais emissões de gases de efeito estufa nessas áreas. Dessa forma, espera-se fornecer subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes de proteção ambiental projetar cenários futuros e orientar a tomada de decisões governamentais visando a proteção desses remanescentes naturais (SOARES-FILHO, 2013).

3.2 DADOS E MÉTODOS

Este trabalho foi dividido nas seguintes etapas principais: diagnóstico do desmatamento histórico e modelagem espacial do desmatamento nas FPND. A modelagem do desmatamento das FPND foi estruturada em etapas, conforme apresentado na Figura 1, buscando entender de forma mais detalhada as causas e padrões do desmatamento nessas áreas. Essa modelagem espacial se baseia no uso de ferramentas, como o Peso de Evidências, para análise dos determinantes espaciais do desmatamento. Para desenvolvimento da modelagem, foi utilizada a plataforma livre Dinamica EGO 7.0 (ver <https://csr.ufmg.br/dinamica/>).

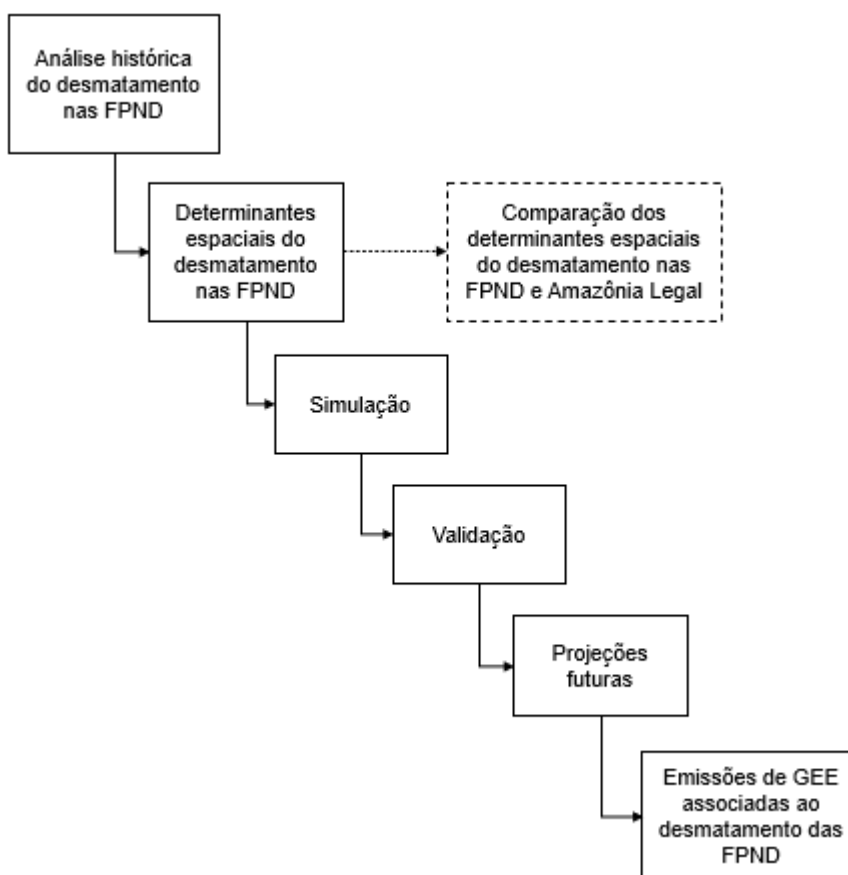


Figura 1 - Estrutura das etapas metodológicas do estudo

3.2.1 Região de estudo

Inicialmente, foi obtida a área de estudo das FPND a partir do Cadastro Nacional de Florestas Públicas (SFB, 2020; Figura 2). Foram consideradas apenas as FPND da Amazônia Legal já que estas abrangem quase a totalidade da área ocupada pelas FPND do país (valor superior a 99%). Os dados analisados apontam que as FPND ocupam uma área de 63 milhões de hectares (SFB, 2020), o equivalente a 7,4% do território brasileiro. Entretanto, há divergências quanto ao tamanho dessa área, devido a sobreposição destas florestas com outras áreas públicas, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas. Isso pode ser justificado pela falta de atualização da designação das FPND para instrumentos de gestão, divergências na espacialização dos seus limites territoriais ou falta de atualização do Cadastro Nacional de Florestas Públicas (AZEVEDO-RAMOS et al, 2020). No presente

trabalho, foi considerada a área original disponível pelo Serviço Florestal Brasileiro, condizente com os cálculos realizados (63 milhões de hectares).

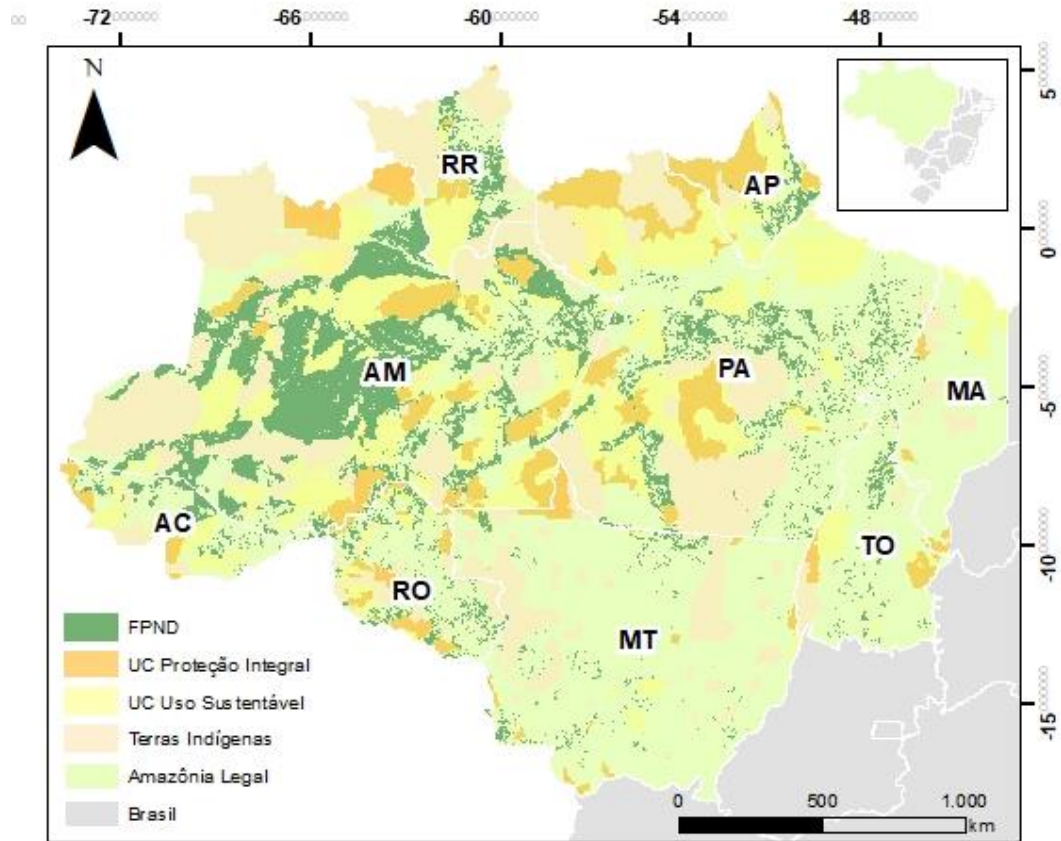


Figura 2 - Localização das Florestas Públicas Não Destinadas na Amazônia Legal

3.2.2 Dados

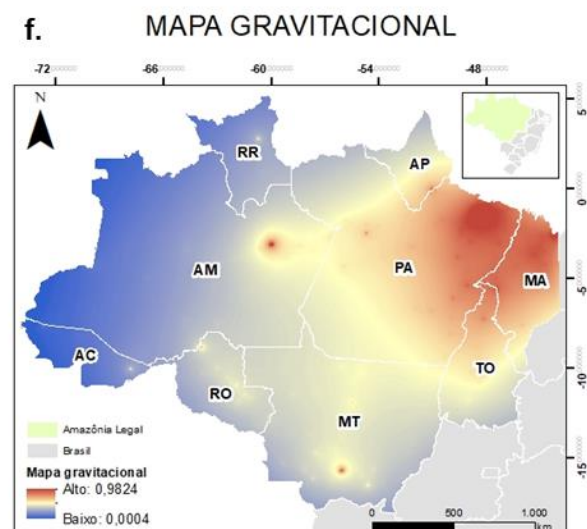
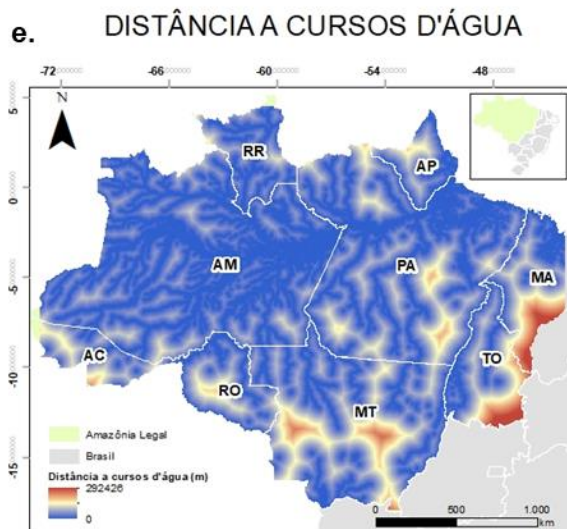
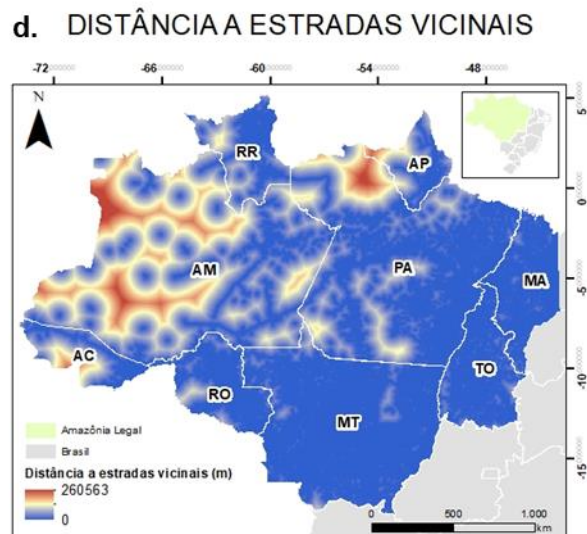
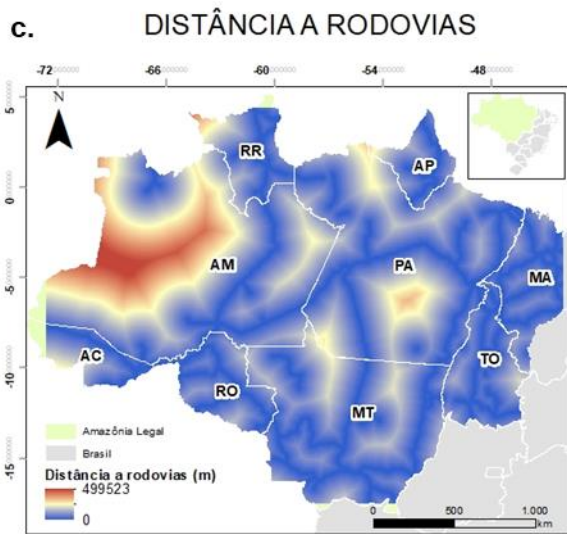
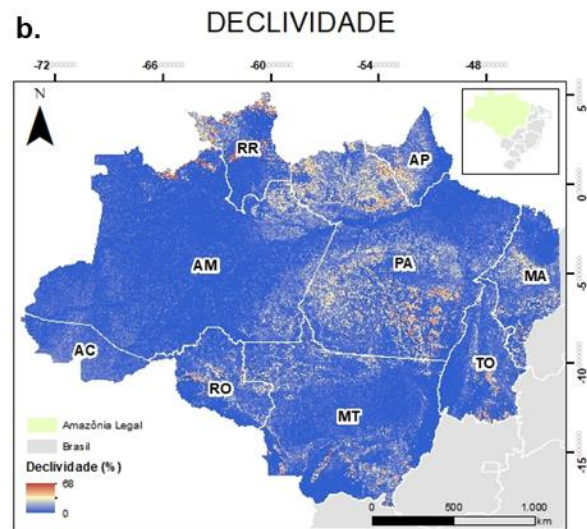
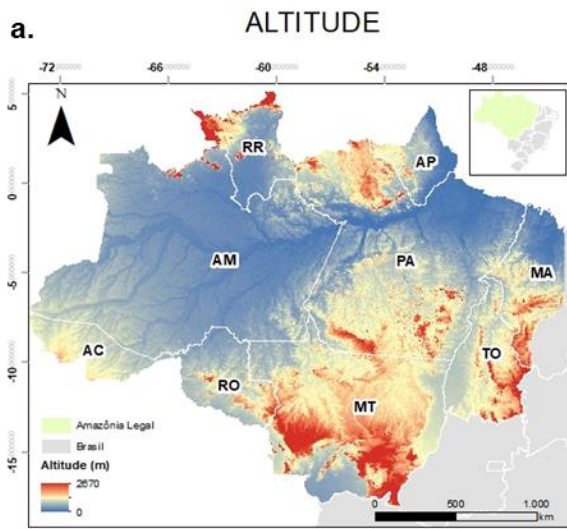
Os determinantes espaciais foram obtidos em diversas fontes e aqueles considerados como contínuos, foram analisados a partir de diferentes intervalos (também denominados como “incrementos”) (Quadro 1). Os intervalos foram selecionados a partir de testes no *software* Dinamica EGO, em que foram selecionados os valores que gerou resultados significantes).

Quadro 1 – Determinantes espaciais selecionados para análise do Peso de Evidências

DETERMINANTES ESPACIAIS	TIPO	FONTE DOS DADOS
Altimetria	Biofísica	NASA (2020); CSR/UFMG (2022)
Declividade	Biofísica	Obtido através da base de dados de “Altimetria”
Distância a rodovias	Antrópica	DNIT (2022)
Distância a estradas vicinais	Antrópica	SOARES-FILHO (2016)
Distância a cursos d’água	Biofísica	INPE (2022)
Distância a áreas previamente desmatadas	Antrópica	INPE (2022)
Mapa gravitacional	Antrópica	IBGE (2021)
Vegetação	Biofísica	IBGE (1978); CSR/UFMG

Os determinantes espaciais mencionados acima foram tratados para seu uso no modelo. Toda base de dados foi ajustada na projeção geográfica GCS SIRGAS 2000 em arquivos de formato *raster* com resolução de 0,0027° (\approx 300 metros). Os determinantes espaciais distância a rodovias, estradas vicinais, cursos d’água e áreas previamente desmatadas foram obtidos através do cálculo da distância euclidiana das células até a categoria referência no *software* Dinamica EGO.

Os mapas dos determinantes espaciais utilizados para análise do peso de evidências são apresentados na Figura 3 (a-g). O determinante espacial “Distância a áreas previamente desmatadas” foi calculado automaticamente no *software* Dinamica EGO e, por isso, não foi apresentado seu mapa.



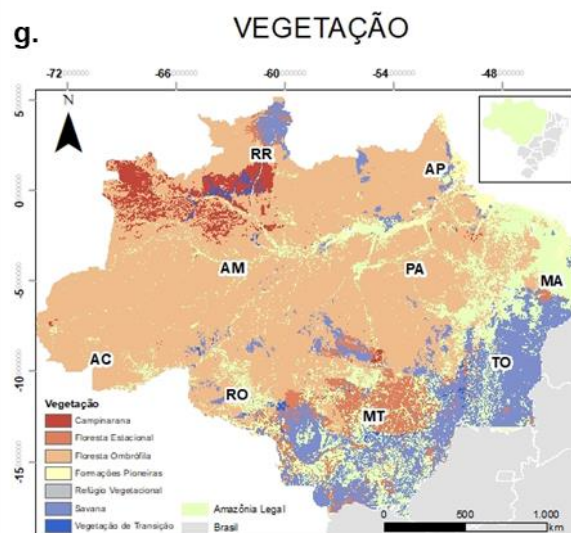


Figura 3 - Mapas dos determinantes espaciais utilizados na modelagem espacial

- (a) Altitude (b) Declividade (c) Distância a rodovias (d) Distância a estradas vicinais
(e) Distância a cursos d'água (f) Mapa gravitacional (g) Vegetação

3.2.3 Análise histórica do desmatamento nas FPND

O diagnóstico do desmatamento histórico foi realizado com o cálculo do desmatamento anual entre os anos de 2008 e 2021 nas FPND através de álgebra de mapas, analisando a distribuição por estado e sua participação relativa no desmatamento total da Amazônia Legal.

3.2.4 Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND

A modelagem do desmatamento das FPND foi elaborada a partir de um modelo probabilístico espacialmente explícito implementado na plataforma livre Dinamica EGO. Para realização dessa etapa, a análise considerou desmatamento acumulado até 2008 (selecionado como ano “inicial”) e desmatamento acumulado até 2014 (selecionado como ano “final”). Com objetivo de compreender a influência de características espaciais no desmatamento, foi realizada a etapa denominada como Peso de Evidências, um modelo espacialmente explícito com objetivo de prever a alocação do desmatamento com base em determinantes espaciais (SOARES-FILHO et al, 2013). É um método bayesiano de compreensão da relação empírica dos determinantes espaciais analisados e as transições identificadas na área de estudo (RIBEIRO et al., 2021).

Os pesos de evidência representam a probabilidade de ocorrer uma transição $i \rightarrow j$ (p.ex: floresta para área desmatada), dado a evidência de que uma variável estática (p.ex: distância das rodovias), tenha ocorrido. Essa probabilidade é expressa pelas equações 1 e 2, onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ correspondem respectivamente às chances de ocorrer a priori o evento D e de ocorrer D , dada a existência da variável B . $W+$ é, portanto, o peso de evidência de ocorrer o evento D , dado um padrão espacial B (Soares-Filho, 2007).

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W+ \quad (\text{Equação 2})$$

Considerando $O\{D\}=1$, uma vez que esta probabilidade já será passada ao modelo via matriz de transição, obtém-se a probabilidade a posteriori de uma transição $i \rightarrow j$, que é expressa pela Equação 3, onde V refere-se a um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x, y e representadas por seus pesos $W+ k1 xy, W+ k2 xy, \dots, W+ kn xy$, sendo n o número de categorias de cada variável k (SOARES-FILHO et al., 2007).

$$P(i \rightarrow j(xy)/V) = \frac{e^{\sum_k Wkn_{i \rightarrow j(V)xy}}}{1 + \sum_{ij} e^{\sum_k Wkn_{i \rightarrow j(V)xy}}} \quad (\text{Equação 3})$$

Para realização do peso de evidências, foram selecionados os seguintes determinantes espaciais:

- **Altimetria e declividade:** altitudes elevadas (principalmente em locais de declividades elevadas) podem tornar o terreno inviável para a prática de atividades antrópicas, e conseqüentemente para o desmatamento (ROCHA et al., 2012);
- **Distância a rodovias e distância a estradas vicinais:** para o desmatamento da Amazônia Legal, sabe-se do potencial de influência de rodovias e estradas vicinais para atração do desmatamento devido à necessidade de infraestrutura de transporte rodoviário para acesso ao local e necessidade de escoamento de madeira (VILELA et al, 2020; SILVA, 2007);
- **Distância a cursos d'água:** cursos d'água, assim como estradas vicinais e rodovias, podem influenciar a ocorrência de desmatamento por ser uma forma de acesso a essas áreas (SOARES-FILHO et al, 2001);

- **Distância a áreas previamente desmatadas:** há correlação entre as mudanças do uso do solo de determinada área com os processos que ocorrem na vizinhança devido ao irradiação de manchas previamente desmatadas (SOARES-FILHO et al, 2001; PIONTEKOWSKI et al. 2012).
- **Mapa gravitacional (atração populacional):** possibilidade de influência de adensamentos urbanos em atrair ou repelir o desmatamento (SOARES-FILHO et al, 2013);
- **Vegetação:** o tipo de vegetação pode influenciar a atratividade do desmatamento devido ao seu uso para exportação de madeira ilegal (KRUID et al, 2022).

A única suposição considerada no modelo é de independência dos determinantes espaciais (BONHAM-CARTER, 1994). Para isso, realizou-se o cálculo de correlação par a par entre os determinantes espaciais, para identificar o grau de similaridade existente entre eles e, assim, garantir que os determinantes espaciais sejam independentes. São utilizados testes estatísticos de correlação Qui-Quadrado, Cramer, Contingência, Entropia e *Joint Information Uncertainty* (BONHAM-CARTER, 1994). Para o estudo, foram considerados como referência o Índice de Cramer e o Coeficiente de Contingência.

Os limiares utilizados como referência para indicar a correlação dos determinantes espaciais são descritos no Quadro 2. Caso seja identificada correlação, um dos determinantes espaciais é excluído da análise e a etapa de peso de evidências refeita.

Quadro 2 - Limiares de valor dos métodos que indicam correlação

MÉTODO	LIMIAR
Índice de Cramer	Valores superiores a 0.5 são considerados correlacionados (MOLIN et al, 2017)
Coeficiente de Contingência	Valores superiores a 0.7 são considerados correlacionados (REIS, 2001)

Na análise de correlação, os valores obtidos no Índice de Cramer e no Teste de Contingência são apresentados respectivamente nos Quadro 3 e Quadro 4. Considerando os limiares dos parâmetros, não foram identificadas correlações entre os determinantes espaciais, comprovando que todos são independentes entre si.

Quadro 3 - Resultado dos testes de correlação Índice de Cramer

	Altitude	Declividade	Distância a áreas previamente desmatadas	Distância a cursos d'água	Mapa gravitacional	Distância a rodovias	Vegetação	Distância a estradas vicinais
Altitude		0.22	0.09	0.18	0.19	0.16	0.30	0.14
Declividade	0.22		0.13	0.11	0.20	0.17	0.10	0.16
Distância a áreas previamente desmatadas	0.09	0.13		0.10	0.12	0.12	0.14	0.16
Distância a cursos d'água	0.18	0.11	0.10		0.10	0.11	0.12	0.09
Mapa gravitacional	0.19	0.20	0.12	0.10		0.17	0.18	0.19
Distância a rodovias	0.16	0.17	0.12	0.11	0.17		0.16	0.21
Vegetação	0.30	0.10	0.14	0.12	0.18	0.16		0.17
Distância a estradas vicinais	0.14	0.16	0.16	0.09	0.19	0.21	0.17	

Quadro 4 - Resultado dos testes de correlação Teste de Contingência

	Altitude	Declividade	Distância a áreas previamente desmatadas	Distância a cursos d'água	Mapa gravitacional	Distância a rodovias	Vegetação	Distância a estradas vicinais
Altitude		0.43	0.32	0.56	0.60	0.54	0.59	0.48
Declividade	0.43		0.27	0.24	0.41	0.35	0.22	0.34
Distância a áreas previamente desmatadas	0.32	0.27		0.34	0.43	0.44	0.32	0.55
Distância a cursos d'água	0.56	0.24	0.34		0.34	0.39	0.28	0.32
Mapa gravitacional	0.60	0.41	0.43	0.34		0.63	0.41	0.61
Distância a rodovias	0.54	0.35	0.44	0.39	0.63		0.36	0.65
Vegetação	0.59	0.22	0.32	0.28	0.41	0.36		0.39
Distância a estradas vicinais	0.48	0.34	0.55	0.32	0.61	0.65	0.39	

Os resultados obtidos dos coeficientes dos pesos de evidências foram plotados em gráfico em função do menor valor do intervalo analisado. A partir disso, foram obtidas as linhas de tendências para obter as funções matemáticas que representam o comportamento dos coeficientes dos pesos para cada um dos determinantes espaciais. Os valores dos coeficientes foram corrigidos conforme a expressão polinomial representativa para aquela variável.

3.2.5 Comparação dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal

Com o objetivo de compreender possíveis diferenças no comportamento dos coeficientes espaciais que influenciam o desmatamento entre as FPND e a região em

que estão localizadas, foi realizada a etapa de Peso de Evidências para toda a Amazônia Legal. Nessa análise, os dados foram plotados e comparados para avaliar possíveis divergências na favorabilidade ou repulsa ao desmatamento nos intervalos de cada variável analisada. Essa análise espacial permite uma melhor compreensão dos padrões e dos determinantes do desmatamento, bem como de possíveis diferenças entre as FPND e a região em que estão inseridas. Com base nos resultados obtidos, é possível desenvolver estratégias mais eficazes de proteção ambiental e fiscalização para a preservação desses importantes remanescentes naturais.

3.2.6 Simulação

Essa simulação tem como objetivo avaliar como os resultados obtidos na etapa de calibração se aproximam da realidade. Para isso, é realizada abordagem de autômatos celulares para expandir e alocar novas áreas de desmatamento de acordo com os coeficientes dos pesos obtidos na etapa anterior. A simulação considerou como mapa inicial o mapa de desmatamento acumulado até o ano de 2014 e mapa final o mapa de desmatamento acumulado até o ano de 2020.

A construção da etapa de simulação é baseada na abordagem de autômatos celulares e são utilizados operadores através do *software* Dinamica EGO para expansão das áreas já desmatadas e a formação de novas manchas ou áreas de desmatamento a partir de seleção estocástica das células que têm maior probabilidade de passarem por transição (RIBEIRO et al, 2021). Para isso, também são consideradas as informações de média do tamanho das manchas de desmatamento, desvio padrão e isometria. Esses valores foram obtidos a partir da análise dessas métricas da paisagem do desmatamento realizado entre 2014 e 2020 (Quadro 5).

Quadro 5 - Métricas da paisagem do desmatamento entre 2014 e 2020

Tamanho médio	50,95 ha
Desvio padrão	54646,14
Isometria	0,5

O resultado dessa etapa é mapa de desmatamento “simulado” para 2020 e mapa de probabilidade de ocorrência do desmatamento nesse mesmo ano.

3.2.7 Validação

A validação da simulação foi realizada com objetivo de averiguar a similaridade do mapa “simulado” com o mapa “observado” do desmatamento acumulado até o ano de 2020. Assim como as etapas anteriores, a validação foi realizada através do *software* Dinamica EGO através do método da função de decaimento constante tipo Fuzzy que considera uma similaridade difusa a partir da localização e da categoria dentro de uma análise de vizinhança celular. O resultado da validação é o mapa de diferenças do “simulado” e do “observado” em comparação ao mapa inicial, que indica a similaridade entre esses mapas dentro de uma janela de *pixels* para considerar as células da vizinhança (RIBEIRO et al., 2021). Adotou-se uma função de decaimento constante, calculada com os seguintes tamanhos de janelas: 1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 11x11, 13x13, 15x15, 17x17, 19x19 e 21x21

Para comparar a eficácia dos determinantes espaciais selecionados, os resultados da validação foram comparados com modelo aleatório de desmatamento, denominado modelo-nulo. O modelo-nulo é a realização da simulação do desmatamento sem considerar a influência dos determinantes espaciais selecionados previamente. Dessa forma, a probabilidade de ocorrer desmatamento em qualquer célula é de 50%, ocorrendo de maneira aleatória (SONTER et al, 2020). O resultado do modelo nulo é um mapa de desmatamento “simulado” em 2020, que foi comparado com o mapa de desmatamento “observado” no mesmo ano na etapa de validação.

Os resultados da validação da simulação do desmatamento em 2020 com uso dos determinantes espaciais e com o modelo nulo foram comparados para avaliar a eficácia do modelo com uso de determinantes espaciais na modelagem do desmatamento nas FPND. Os valores comparados foram da janela mínima 11x11.

Caso a validação do modelo com uso dos determinantes espaciais seja superior ao do modelo-nulo, entende-se que o uso dos determinantes espaciais é mais eficaz para modelagem do uso do desmatamento das FPND.

3.2.8 Projeções futuras

Uma vez que se entende que o modelo construído é útil para construção de cenários futuros, é factível realizar a projeção do desmatamento a partir dos coeficientes dos pesos ajustados no comportamento da sua função polinomial para cada determinante espacial. Considerando 2020 como “ano inicial”, a projeção futura do desmatamento em FPND é realizada para os anos de 2021 a 2050 anualmente. Para projeção futura, também é considerada a taxa de transição anual de floresta para área desmatada entre 2014 e 2020, valor de 0,38%.

Os resultados dessa etapa são os mapas de desmatamento de cada ano e seus respectivos mapas de probabilidade.

3.2.9 Emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND

Para analisar o cenário tendencial do desmatamento nas FPND, foram calculadas as emissões de GEE das áreas desmatadas entre 2020 e 2050. Para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa, foi utilizado o mapa de estoque de biomassa acima e abaixo do solo (SOARES-FILHO *et al*, 2016), que simula a biomassa de vegetação original presente nos biomas brasileiros.

A partir do mapa de biomassa, é calculado o estoque de carbono florestal presente nas áreas desmatadas. Para isso, foi utilizada a equação 4.

$$EC = AreaDes \times Biovalor \times BioC \quad (\text{Equação 4})$$

Em que “EC” é o estoque de Carbono, “AreaDes” é a área desmatada, “Biovalor” é o valor específico de biomassa relativo à célula desmatada proveniente do mapa descrito acima, “BioC” é o conteúdo de carbono da biomassa, dado pelo valor fixo de 0,5. A área desmatada foi obtida através do mapa de diferenças entre 2020 e o ano de 2050.

As emissões do CO₂ foram estimadas a partir da perda de carbono florestal presente nas áreas desmatadas. Então, foi aplicada a Equação 5 adaptada de Numata *et al* (2011) e Hissa *et al*. (2018):

$$ETC = EC \times TCO_2 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que “ETC” é a emissão total de CO₂, “EC” é o estoque de carbono e “TCO₂” é o valor de toneladas de CO₂ equivalente. O CO₂ equivalente é a unidade de medida para calcular as emissões de gases de efeito estufa. Para o presente trabalho, considera-se que as emissões oriundas do desmatamento são apenas de CO₂ e que todo estoque de carbono será transformado em emissão. Dessa forma, a variável “TCO₂” é o fator de conversão 3,67, que corresponde a relação entre a massa molar de uma molécula de CO₂ (12+16+16=44) e uma molécula de carbono (12). Assim, tem-se o quanto de CO₂ a quantidade de carbono presente na árvore poderia formar se estivesse disponível na atmosfera (HOUGHTON et al, 2001).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Análise histórica do desmatamento nas FPND

O diagnóstico realizado obteve a área total das FPND e as áreas desmatadas ao longo do período entre 2008 e 2021, período disponível anualmente pelo PRODES/INPE. Durante o período analisado, aproximadamente 2,7 milhões de hectares foram desmatados dentro dos limites atuais das FPND, o que representa ≈ 25% do desmatamento total na Amazônia Legal Brasileira. Nota-se um expressivo aumento do desmatamento a partir de 2019, ano a partir do qual o desmatamento nas FPND saltou para 30% do desmatamento da Amazônia Legal Brasileira (Figura 4).

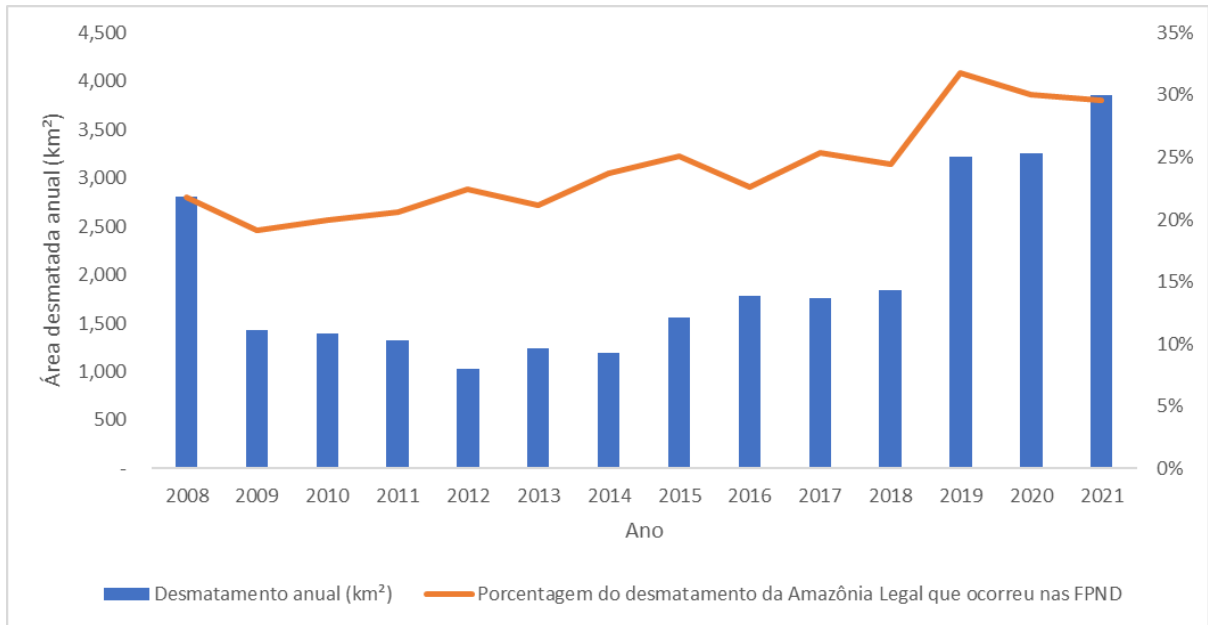


Figura 4 - Evolução histórica do desmatamento nas Florestas Públicas Não Destinadas

As FPND apresentaram maior participação no desmatamento no Amazonas, contribuindo com 40% do desmatamento do estado entre 2008 e 2021 (Figura 5a). Considerando os valores absolutos do desmatamento, o estado do Pará apresentou maior desmatamento em FPND, totalizando quase 14 mil km² (Figura 5b).

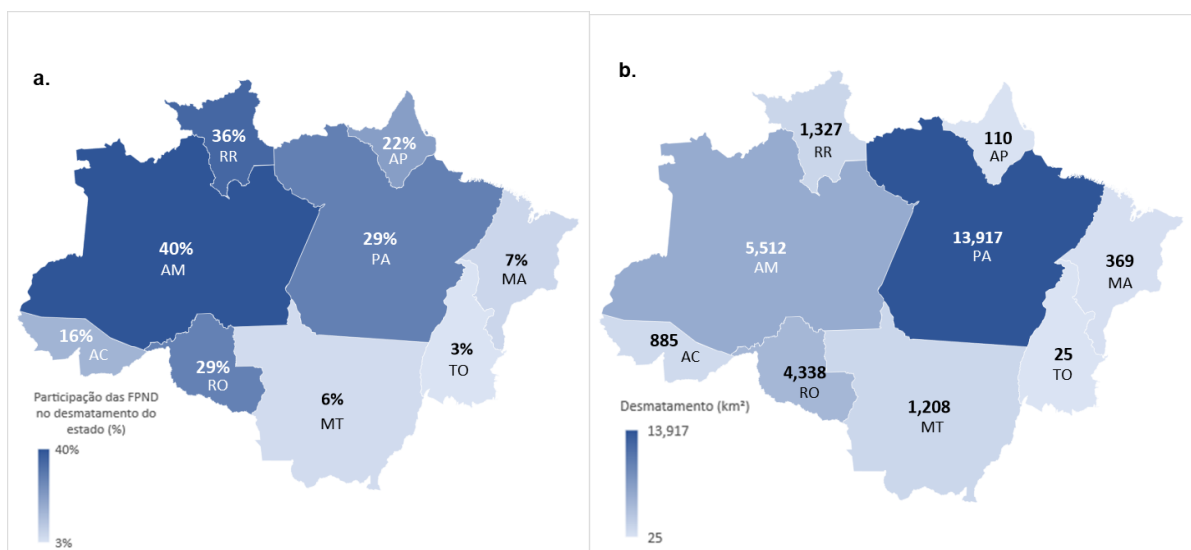


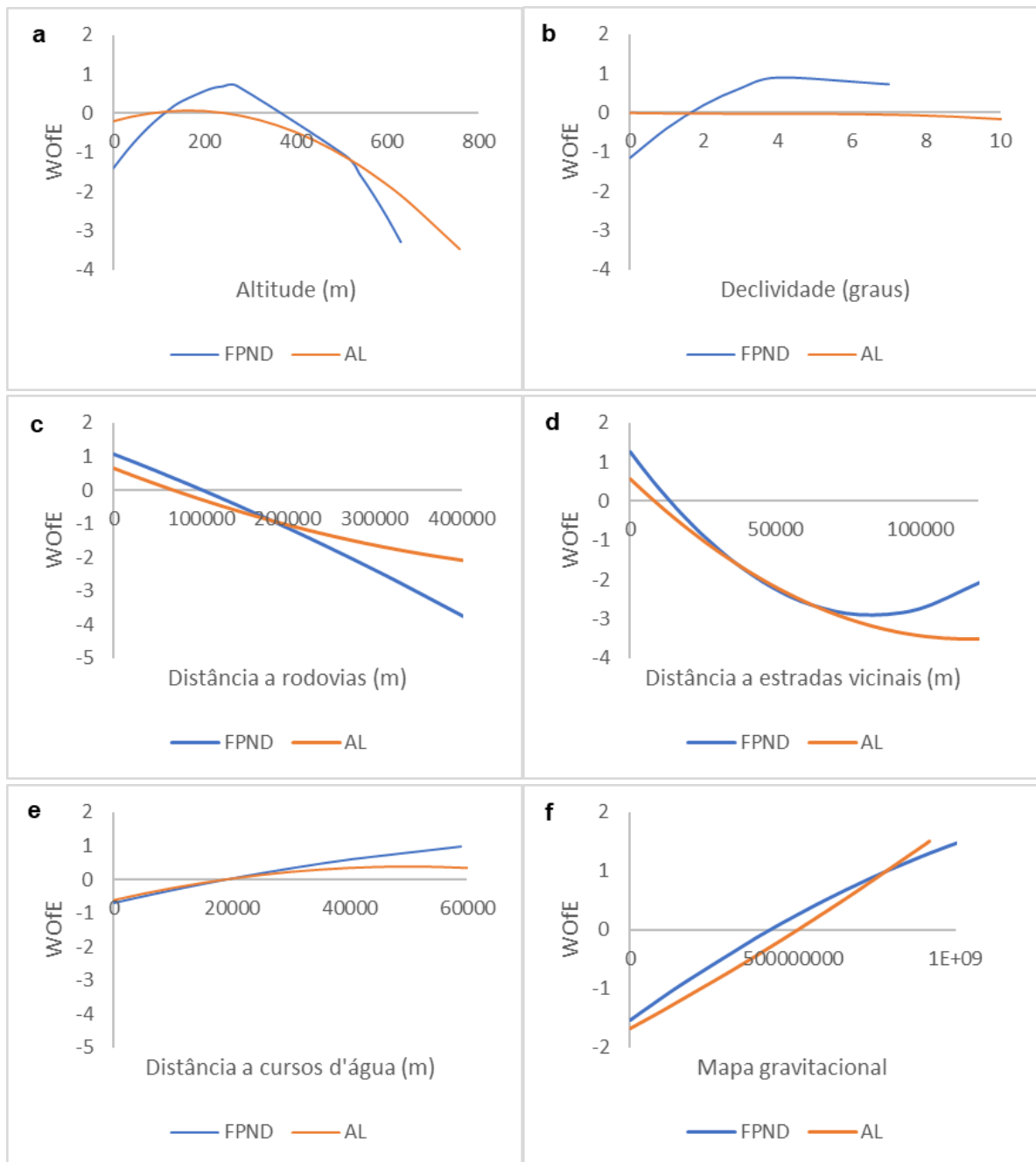
Figura 5 - Distribuição do desmatamento nas Florestas Públicas Não Destinadas por estado

(a) Média da participação do desmatamento nas FPND no desmatamento total do estado entre 2008 e 2021

(b) Total do desmatamento em FPND por estado entre 2008 e 2021

3.3.2 Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND

O resultado dos pesos de evidências estimados para cada um dos determinantes espaciais no desmatamento das FPND e da Amazônia Legal são apresentados na Figura 6 (a-h). Quando o coeficiente do peso (WOfE) é positivo, considera-se que há favorabilidade de alocação no desmatamento. Por outro lado, quando o coeficiente assume valores negativos, considera-se que há repulsa ao desmatamento no intervalo analisado.



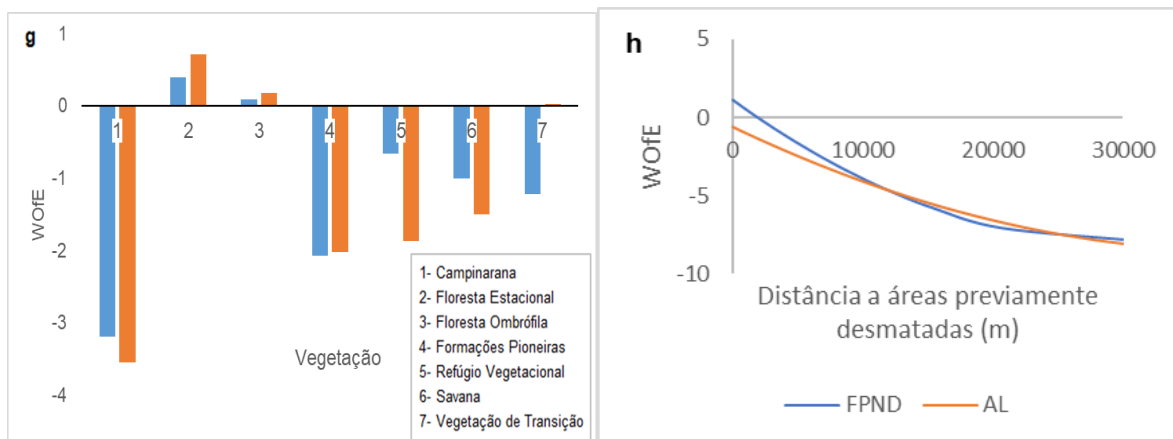


Figura 6 - Comparação dos pesos dos determinantes espaciais nas Florestas Públicas Não Destinadas e na Amazônia Legal

- (a) Altitude; (b) Declividade; (c) Distância a rodovias; (d) Distância a estradas vicinais; (e) Distância a cursos d'água; (f) Mapa gravitacional. (g) Vegetação; (h) Distância a áreas previamente desmatadas

Verifica-se que há repulsa ao desmatamento quando altitude é inferior a 100 metros e superior a 400 metros (Figura 6a). Entre esses valores, há um favorecimento da alocação do desmatamento. Para declividade, há uma favorabilidade ao desmatamento quando superior a, aproximadamente, 2°. Para esse determinante espacial, percebe-se que a análise se limita até 7° devido à pouca representatividade de declividade superiores a essa nas FPND (Figura 6b).

Distância a rodovias, estradas vicinais e áreas previamente desmatadas apresentam comportamento similares entre si. Quanto menor a distância, maior a favorabilidade de alocação do desmatamento. Para rodovias, a repulsa ao desmatamento acontece a partir dos 100.000 metros de distância (Figura 6c). Para estradas vicinais, a repulsa inicia a partir de, aproximadamente, 20.000 metros de distância (Figura 6d). Para áreas previamente desmatadas, a repulsa ao desmatamento (Figura 6h).

Para os determinantes espaciais de distância a cursos d'água e mapa gravitacional, quanto maior os seus valores, os valores do coeficiente do peso também crescem gradativamente. Especificamente para distância a cursos d'água, a partir de 20.000 metros há favorabilidade do desmatamento (Figura 6e). Para mapa gravitacional, quanto maior o adensamento populacional, maior a influência de alocação do desmatamento em FPND (Figura 6f).

Em relação à vegetação, evidencia-se que há favorabilidade da alocação do desmatamento para os tipos de vegetação Floresta Estacional (2) e Floresta Ombrófila (3). Para as demais, há repulsa ao desmatamento (Figura 6g).

3.3.3 Comparação dos coeficientes dos pesos dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal

Os resultados dos coeficientes dos pesos dos determinantes espaciais na Amazônia Legal apresentam comportamento muito similar aos das FPND. Exceto pela variável “Declividade” (Figura 6b), as tendências são bem próximas.

Para o determinante espacial “Altitude” (Figura 6a) há crescimento do coeficiente do peso entre 200 e 250 metros e posterior redução. As FPND apresentam os menores e maiores valores do coeficiente, indicam maior variabilidade de alocação ou repulsa ao desmatamento de acordo com a altitude. A declividade é o determinante espacial que apresenta comportamentos distintos (Figura 6b). Para as FPND, a partir de 2° de declividade, os coeficientes assumem valores positivos. Para a Amazônia Legal, há uma progressiva, mas pequena, redução dos coeficientes à medida que aumenta a declividade, nunca assumindo valor superior a zero.

Para os determinantes de distância a rodovias (Figura 6c), distância a estradas vicinais (Figura 6d) e distância a áreas previamente desmatadas (Figura 6h), os coeficientes dos pesos das FPND apresentam comportamento similar a da Amazônia Legal, com progressiva redução dos valores. Entretanto, os coeficientes das FPND apresentam valores superiores aos da Amazônia Legal quanto menor a distância analisada. Entretanto, as FPND apresentam maior eficiência em repelir o desmatamento em áreas distantes de rodovias do que a Amazônia Legal.

Em relação a distância a cursos d’água, os coeficientes das FPND e da Amazônia Legal se comportam de maneira bem similar até aproximadamente 30 mil metros, quando os coeficientes das FPND assumem valores superiores aos da Amazônia Legal.

Para os determinantes espaciais de vegetação e mapa gravitacional, as duas áreas analisadas possuem comportamentos bem similares e não é possível identificar diferenças significativas entre elas.

3.3.4 Simulação

A simulação resultou no mapa de desmatamento em 2020, que foi comparado com o observado no mesmo ano. Os resultados são apresentados na Figura 7 (a e b). O mapa “observado” (Figura 7a) totalizou aproximadamente 4,2 milhões de hectares desmatados. O mapa “simulado” (Figura 7b) totalizou aproximadamente 4,5 milhões de hectares desmatados

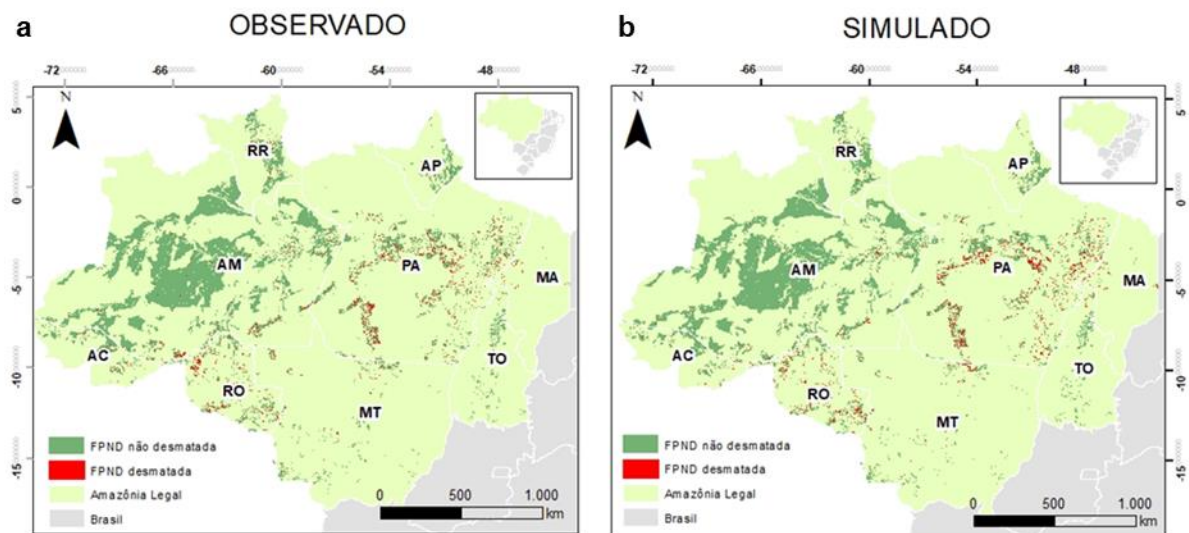


Figura 7 - Mapas de desmatamento em 2020

(a) Mapa de desmatamento observado em 2020 (b) Mapa de desmatamento simulado em 2020

3.3.5 Validação

A validação resultou em uma similaridade de 26,86% na janela 11x11. Em comparação com os resultados do modelo nulo, a validação resultou em 15,06%, também na janela 11x11 (Figura 8). Evidencia-se que o uso dos determinantes espaciais selecionados para modelar o desmatamento em FPND aprimora em 11,8% o resultado que seria obtido em um modelo aleatório de localização do desmatamento.

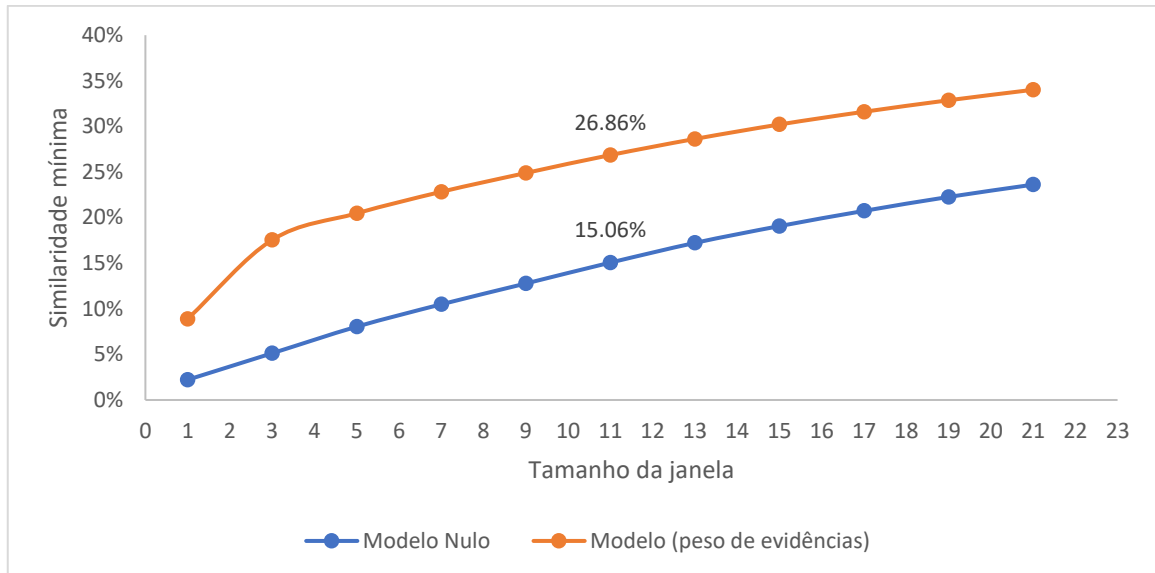


Figura 8 – Comparação da validação do modelo do peso de evidências e do modelo nulo

3.3.6 Projeções futuras

As projeções futuras resultam em mapas de desmatamento de 2020 a 2040, com mapas anuais de desmatamento e probabilidade, em que se identifica quais são as áreas mais suscetíveis à ocorrência de desmatamento. Os anos de 2030 e 2040 foram selecionados como referência para calcular o desmatamento acumulado até esses anos (Figura 9). Ressalta-se que a meta de zerar o desmatamento ilegal no Brasil é até 2028, anterior aos dois horizontes analisados.

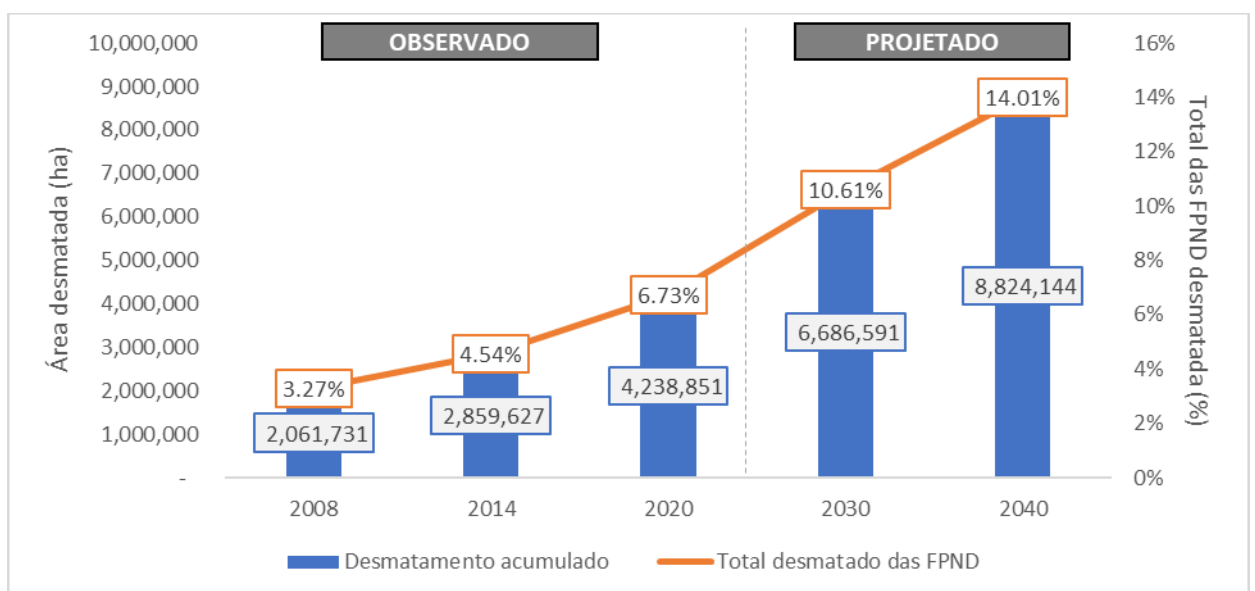


Figura 9 - Projeção do desmatamento acumulado nas Florestas Públicas Não Destinadas

Ao analisar os mapas de desmatamento em 2030 (Figura 10a) e 2040 (Figura 10b), evidencia-se a intensificação do desmatamento principalmente no estado do Pará.

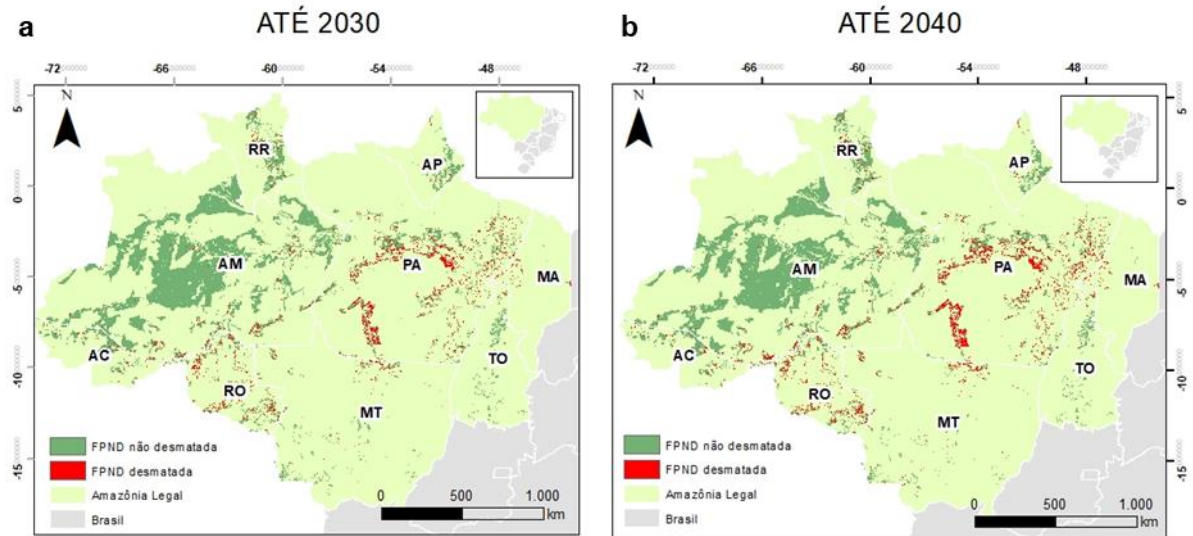


Figura 10 - Mapas da projeção do desmatamento acumulado até 2030 e 2040

(a) Mapa do desmatamento projetado acumulado até 2030

(b) Mapa do desmatamento projetado acumulado até 2040

Os valores anuais do desmatamento da projeção futura foram analisados. Quando analisados os valores anuais projetados de desmatamento das FPND, até 2028, ano de referência do Brasil para zerar o desmatamento ilegal, o Pará pode ser o estado com maior desmatamento, seguido de Rondônia e Mato Grosso (Figura 11).

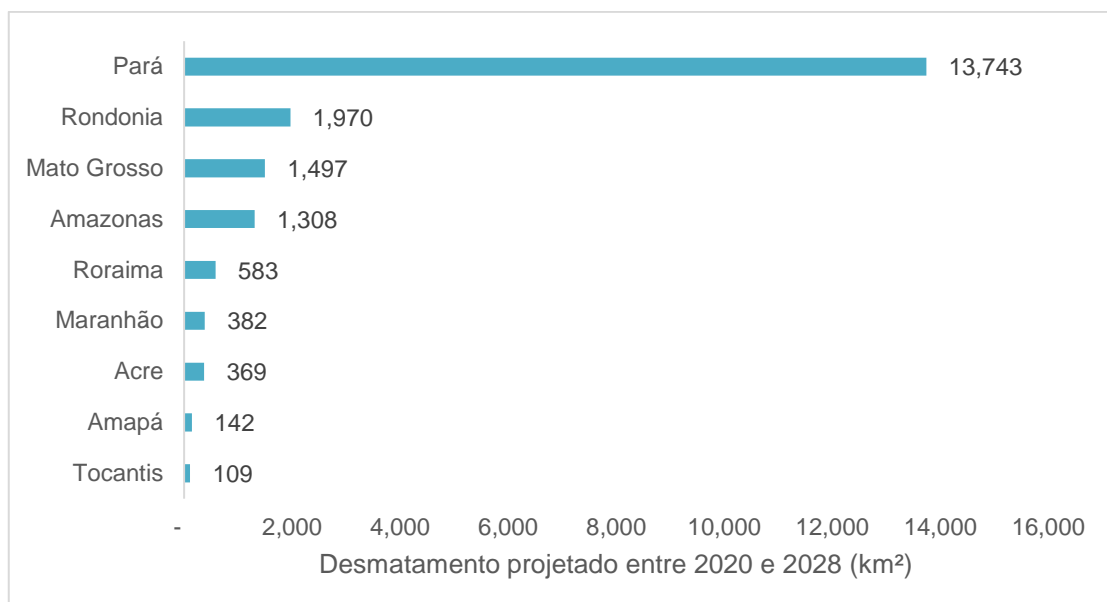


Figura 11 - Desmatamento projetado entre 2020 e 2028 nas Florestas Públicas Não Destinadas por estado

3.3.7 Emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND

Entre os anos de 2020 e 2050, calcula-se emissão de GEE acumulada de aproximadamente 4,6 bilhões de tCO₂e, o que equivaleria a uma emissão anual de 153 milhões de tCO₂e. O Brasil tem a meta de reduzir as suas emissões de GEE em 50% até 2030 e zerar as emissões líquidas até 2050, considerando 2005 como ano-base.

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Análise histórica do desmatamento nas FPND

O crescimento nos últimos três anos da participação das FPND no desmatamento da Amazônia Legal é um indício do enfraquecimento dos instrumentos públicos para contenção do desmatamento em áreas públicas. Este crescimento reforça a relevância e urgência da adoção de medidas para conter o desmatamento nessas áreas. Atualmente, as FPND têm maior participação no desmatamento dos estados do Amazonas, Roraima, Pará e Rondônia. Em valores absolutos, as FPND foram mais desmatadas nos estados do Pará e do Amazonas.

3.4.2 Determinantes espaciais do desmatamento nas FPND

Entre os determinantes espaciais analisados, percebe-se a maior favorabilidade de alocação do desmatamento nas seguintes circunstâncias: proximidade de estradas vicinais, rodovias e áreas previamente desmatadas, baixas altitudes e maiores distâncias a cursos d'água e maior proximidade com adensamentos populacionais (determinante espacial "Mapa gravitacional"). O comportamento dos determinantes espaciais antrópicos (estradas vicinais, rodovias, áreas previamente desmatadas e adensamentos populacionais) indicam que há maior favorabilidade ao desmatamento quanto mais próximas a eles.

3.4.3 Comparação dos determinantes espaciais do desmatamento nas FPND e Amazônia Legal

Percebe-se que o comportamento dos pesos é similar na Amazônia Legal e nas FPND na maioria dos determinantes espaciais analisados. Entretanto, destaca-se a maior exposição das FPND ao desmatamento nas proximidades com rodovias, estradas vicinais e áreas previamente desmatadas, devido ao maior valor dos coeficientes dos pesos para esses determinantes. Por se tratarem de determinantes espaciais antrópicos, isso pode indicar maior exposição a atividades ilegais. A exposição das FPND à grilagem pode justificar o maior impacto de rodovias e estradas vicinais na favorabilidade de alocação do desmatamento nessas regiões, devido a essas infraestruturas serem comumente utilizadas por grileiros para o acesso a áreas públicas (FERRANTE et al, 2021).

Mesmo estando inseridas na Amazônia Legal, as FPND estão expostas em diferentes intensidades para cada determinante espacial. Essa distinção dos coeficientes dos pesos de evidências também indicam a importância dos planos e ações contra o desmatamento considerarem os diferentes contextos que levam ao desmatamento em cada categoria fundiária e as regiões que estão mais expostas.

3.4.4 Projeções futuras e emissões de GEE associadas ao desmatamento das FPND

Ao analisar os mapas de projeções futuras, evidencia-se a magnitude do desmatamento nas FPND, podendo abranger 14% da totalidade dessas áreas até

2040, caso se mantenha o cenário tendencial analisado no período 2008 a 2020. Podendo totalizar quase 9 milhões de hectares desmatados em 2040, esses resultados indicam que há tendência expansão do desmatamento nessas áreas, levando ao desmatamento total das FPND superior ao dobro do que já foi desmatado até 2020 (aproximadamente 4,2 milhões de hectares).

Os principais estados que as FPND tendem a ter maior desmatamento entre 2020 e 2028 são Pará, Rondônia e Mato Grosso. Em comparação com a série histórica (seção 2.3.1), percebe-se que é um cenário similar dos estados que as FPND tiveram maior desmatamento entre 2008 e 2021 (Figura 5), exceto pelo estado do Amazonas que no histórico foi o estado com o segundo maior desmatamento nas FPND, mas no cenário futuro é o estado com o quarto maior desmatamento. Em contrapartida, o estado do Mato Grosso, entre 2008 e 2021, foi o estado com o quinto maior desmatamento nas FPND, mas é projetado que em 2028 represente o terceiro maior desmatamento.

Além de todos os prejuízos locais na biodiversidade, regime de chuvas e nos serviços ecossistêmicos, as FPND representam importante estoque de carbono florestal. Considerando a biomassa acima e abaixo do solo nas vegetações, o desmatamento dessas áreas entre 2020 e 2050 pode levar a emissão de 4,6 bilhões de tCO₂e, valor três vezes superior a 1,49 bilhão de tCO₂e já emitidos pelas FPND até 2020 (IPAM, 2021). Essas emissões totais representam a emissão de 153 milhões de tCO₂e anualmente, equivalente a 7% das emissões de GEE do Brasil em 2020 (POTENZA et al, 2021). As emissões de GEE anuais das FPND também seriam superiores à emissão de GEE anual do setor industrial, que em 2020 totalizou 100 milhões de tCO₂e. Caso seja cumprida a meta de zerar o desmatamento ilegal em 2028, algo que demandará maiores esforços do que é vivenciado hoje, poderá se evitar até 2050 a emissão de 3,4 bilhões de tCO₂e, equivalente a 6 anos de emissões de GEE do setor agropecuário.

Esses resultados apontam a relevância das FPND para manutenção da integridade da vegetação nos limites da Amazônia Legal, que compreende em grande parte o bioma amazônico. Como solução, a destinação de terras públicas é vista como uma das alternativas para contenção das atividades ilegais que ocorrem nas FPND. Estudos indicam que a designação das FPND para terras particulares pode ser eficaz para redução do desmatamento, porém em menor eficácia e confiabilidade do que

regimes de conservação ou designação para povos tradicionais, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas, respectivamente (PACHECO e MEYER, 2022). Dessa forma, entende-se que as ações prioritárias para conter o desmatamento das FPND passa diretamente pela sua designação, principalmente para regimes de conservação já instituídos.

3.5 CONCLUSÕES

A participação das Florestas Públicas Não Destinadas (FPND) no desmatamento da Amazônia Legal cresceu nos últimos três anos, sugerindo que os instrumentos públicos para conter o desmatamento em áreas públicas estão enfraquecidos. Esse crescimento ressalta a importância e urgência da adoção de medidas para combater o desmatamento nessas áreas. As FPND são responsáveis pela maior parte do desmatamento nos estados da região e são influenciadas por fatores como a proximidade de estradas vicinais e rodovias, áreas previamente desmatadas, baixas altitudes, maiores distâncias de cursos d'água e maior proximidade com adensamentos populacionais.

Comparando com a Amazônia Legal, percebe-se comportamentos semelhantes dos determinantes espaciais em ambas as escalas de análise. Entretanto, as FPND apresentam maior coeficientes do peso nas proximidades de rodovias, estradas vicinais e áreas previamente desmatadas. o que pode indicar maior exposição a atividades ilegais, como a grilagem. Esses resultados apontam a relevância de direcionar planos e ações específicos para contenção do desmatamento nas FPND.

A análise de projeções futuras mostra que as FPND podem ter até 14% de suas áreas desmatadas até 2040, o que pode resultar em quase 9 milhões de hectares desmatados da área total das FPND. Além dos prejuízos locais à biodiversidade, regime de chuvas e serviços ecossistêmicos, as FPND representam um importante estoque de carbono florestal. A emissão de 3,4 bilhões de tCO₂e pode ser evitada até 2050 se a meta de zerar o desmatamento ilegal em 2028 for cumprida. Caso contrário, essa emissão anual de gases de efeito estufa (GEE) pode chegar a 153 milhões de tCO₂e, equivalente a 7% das emissões de GEE do Brasil em 2020 e superior às emissões anuais do setor industrial em 2020.

A destinação de terras públicas, de acordo com a Lei de Gestão de Florestas Públicas, é vista como uma alternativa para conter atividades ilegais nas FPND. Essas terras podem ser designadas para categorias de proteção fundiária, como Unidades de Conservação e Terras Indígenas, ou para reforma agrária, como assentamentos. Estudos indicam que a designação das FPND é efetivo na redução do desmatamento, sendo mais eficiente e confiável quando designadas para regimes de conservação ou para designação para povos tradicionais do que para terras particulares.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO-RAMOS, Claudia et al. Lawless land in no man's land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104863, 2020.

BONHAM-CARTER, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for geoscientists: Modelling with GIS*. 416p. Pergamon, Ottawa. ISBN: 9780080424200.

BRASIL. Lei n. 11.284, de 02 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Brasília: DOU, 2006.

BRASIL. **Projeto de Lei do Senado nº 2.633-A de 2020**. Altera as leis nºs 11.952, de 25 de junho de 2009, 14.133, de 1º de abril de 2021 (Lei de Licitações e Contratos Administrativos), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, a fim de ampliar o alcance da regularização fundiária; e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2252589>>.

BRITO, Brenda. **Nota técnica sobre o Projeto de Lei n.º 2.633/2020**. Belém, PA: Imazon, 2020. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Imazon_Nota_Tecnica_PL2633_2020-1.pdf>.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. VGeo - Visualizador de dados do DNITGeo 2022. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>

FERRANTE, Lucas; ANDRADE, Maryane BT; FEARNSSIDE, Philip M. Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation. **Land Use Policy**, v. 108, p. 105559, 2021.

HISSA, Leticia de Barros Viana; MÜLLER, Hannes; AGUIAR, Ana Paula Dutra; HOSTERT, Patrick; LAKES, Tobia. Historical carbon fluxes in the expanding deforestation frontier of Southern Brazilian Amazonia (1985–2012). **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 77–89, 2018. DOI: 10.1007/s10113-016-1076-2.

HOUGHTON, R. A. et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v. 7, n. 7, p. 731-746, 2001.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha de Setor Censitário 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html>>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1978). Projeto RADAMBRASIL - Mapa de Vegetação do Brasil. Rio de Janeiro, Brasil: IBGE. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/acervo_radambrasil/>

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. PRODES – Amazônia. Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônia Brasileira por Satélite. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates>.

IPAM - INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. Florestas Públicas Não Destinadas & Grilagem. Disponível em: <<https://ipam.org.br/florestas-publicas-nao-destinadas-e-grilagem/#:~:text=Florestas%20p%C3%ABlicas%20n%C3%A3o%20destinadas%20%26%20grilagem,-Na%20Amaz%C3%B4nia%2C%20cerca&text=S%C3%A3o%20as%20chamadas%20florestas%20p%C3%ABlicas,pelas%20popula%C3%A7%C3%B5es%20origin%C3%A1rias%20e%20tradicionais.>>

KRUID, Sanne et al. Beyond deforestation: carbon emissions from land grabbing and forest degradation in the Brazilian Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 645282, 2021.

LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira et al. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021.

LIMA, Mendelson et al. The “New Transamazonian Highway”: BR-319 and Its Current Environmental Degradation. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 823, 2022.

MOLIN, Paulo G. et al. Spatial determinants of Atlantic Forest loss and recovery in Brazil. **Landscape Ecology**, v. 32, p. 857-870, 2017.

MOUTINHO, Paulo; AZEVEDO-RAMOS, Claudia. Untitled public forestlands threat Amazon conservation. **Nature communications**, v. 14, n. 1, p. 1152, 2023.

MOUTINHO, Paulo et al. Amazônia em chamas: desmatamento e fogo em tempos de COVID-19. **Nota Técnica**, n. 4, 2020.

NASA - National Aeronautics and Space Administration; National Geospatial-Intelligence Agency - NGA (2000) Modelo Digital de Elevação (base de dados georreferenciada). Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>.

NUMATA, Izaya; COCHRANE, Mark A.; SOUZA JR, Carlos M.; SALES, Marcio H. Carbon emissions from deforestation and forest fragmentation in the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 044003, 2011. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044003.

PACHECO, Andrea; MEYER, Carsten. Land tenure drives Brazil's deforestation rates across socio-environmental contexts. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5759, 2022.

PIONTEKOWSKI, Valderli Jorge et al. Modelagem do desmatamento para o Estado do Acre utilizando o programa Dinamica EGO. **Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, v. 4, p. 1064-1075, 2012.

POTENZA et al. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. Disponível em: <https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf>.

RIBEIRO, Sônia et al. **Ecologia da paisagem no contexto luso-brasileiro**: volume 1. 1.ed.Curitiba: Appris, 2021.

ROCHA, M.M.; YAMAMOTO, J.K.; WATANABE, J.; FONSECA, P.P. Studying the influence of a secondary variable in Collocated Cokriging estimates. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.84, p.335-346, 2012.

SILVA, A. de Q. Comparação dos fatores determinantes do desflorestamento nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 13., 2007, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3133-3140.

SOARES-FILHO, Britaldo S.; ASSUNÇÃO, Renato M.; PANTUZZO, Alexandre E.. Modeling the Spatial Transition Probabilities of Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier: Transition probability maps indicate where changes may occur in the landscape, thus enabling better evaluation of the ecological consequences of landscape evolution. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

SOARES-FILHO BS, RAJÃO R, MERRY F, RODRIGUES H, DAVID J, LIMA L, MACEDO M, COE M, CARNEIRO A, SANTIAGO L (2016) Brazil's Market for trading forest certificates. **Plos One** 11(4): e0152311. doi:10.1371/journal.pone.0152311"

SOARES-FILHO, Britaldo; RODRIGUES, Hermann; FOLLADOR, Marco. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, v. 43, p. 80-87, 2013.

SONTER, Laura J. et al. Local conditions and policy design determine whether ecological compensation can achieve No Net Loss goals. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 2072, 2020.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Cadastro Nacional de Florestas Públicas. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/cadastro-nacional-de-florestas-publicas>>.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Cadastro Nacional de Florestas Públicas - Atualização 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/cadastro-nacional-de-florestas-publicas>>.

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. **NDC Registry - Brazil First NDC Second update**. Disponível em: <<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>> .

VILELA, Thais et al. A better Amazon road network for people and the environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 13, p. 7095-7102, 2020.

ZENERATTI, Fábio Luiz. O acesso à terra no Brasil: reforma agrária e regularização fundiária. **Revista Katálysis**, v. 24, p. 564-575, 2021.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento contínuo de preocupação com a agenda ambiental não é em vão. Os riscos do avanço predatório do desmatamento têm ficado cada vez mais evidente, principalmente com a proximidade do “*tipping point*” da Amazônia. Mesmo com metas ambiciosas de zerar desmatamento ilegal e reduzir suas emissões de GEE, o Brasil apresentou nos últimos quatro anos uma crescente do desmatamento, trazendo preocupações a cientistas, agentes políticos, organizações e sociedade.

Para contenção do desmatamento no Brasil, é preciso olhar para as Florestas Públicas Não Destinadas. Responsável por 30% do desmatamento da Amazônia Legal e altamente exposta a atividades ilegais, essas áreas apresentam tendência de avanço significativo para os próximos anos. A manutenção do cenário atual não é suficiente para contenção do desmatamento ilegal. O cumprimento da meta de zerar o desmatamento ilegal até 2028 passa diretamente pelo direcionamento de políticas públicas especiais para as FPND, seja para o avanço da sua designação em algum regime de conservação ou para povos tradicionais, ou para impedimento da ocorrência de grilagem e exploração de maneira irregular em suas áreas.

Sobre o modelo empregado, o resultado da validação ficou aquém do que é visto sugerido pela bibliografia. Com resultado superior à validação do modelo-nulo, indicando a relevância dos determinantes espaciais selecionados, ainda há possibilidades de melhorias e ajustes no modelo. Para isso, sugere-se o refinamento da modelagem realizada a partir de três possibilidades: regionalização das FPND para que as áreas sejam modeladas em contextos similares (e.g. dividir a modelagem em FPND estaduais e federais), incorporação de novas variáveis ou aumento do período temporal de calibração e validação do modelo.

Deve-se considerar também que além dos determinantes espaciais, o desmatamento nas FPND pode ser influenciado por questões socioeconômicas e políticas. O cenário político brasileiro entre 2014 e 2020, anos utilizados para validação do modelo, passou por mudanças que implicou na atuação de três diferentes frentes políticas distintas. A não inclusão desses importantes elementos na modelagem também pode corroborar projeção de um cenário tendencial que não considera possíveis enfraquecimentos de órgãos ambientais de fiscalização, medidas de apoio ao avanço do desmatamento e demais ações que vão contra à conservação dos biomas brasileiros. Para sanar isso, recomenda-se que, além do cenário tendencial "*Bussiness as usual*" utilizado no estudo, também sejam realizadas projeções em cenários hipotéticos de maior otimismo ou pessimismo na agenda política ambiental.

Apesar dos desafios impostos de realizar a modelagem espacial para análise do desmatamento em FPND, é inegável a relevância do uso da ferramenta para entendimento dos mecanismos causais e dos possíveis processos de evolução do desmatamento nessas áreas. Os resultados deste trabalho podem corroborar tomadas de decisão, priorização de ações e construção de políticas públicas, medidas essenciais para contenção do desmatamento no Brasil.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Ane et al. Amazônia em chamas: onde está o fogo. **Nota Técnica. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM)**. Distrito Federal, 2019.

ALENCAR, Ane; RODRIGUES, Lucas; CASTRO, Isabel. Amazônia em chamas: o que queima—e onde. **Nota Técnica, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM)**, Distrito Federal, 2020.

ARAÚJO, Roberto; BENATTI, José Eder; PENA, Socorro. Grilagem de terras públicas na Amazônia Brasileira. Brasília: MMA, 2006.

AZEVEDO-RAMOS, Claudia et al. Lawless land in no man's land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104863, 2020.

BRASIL. Lei n. 11.284, de 02 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. Brasília: DOU, 2006.

BRASIL. **Projeto de Lei do Senado nº 2.633-A de 2020**. Altera as leis nºs 11.952, de 25 de junho de 2009, 14.133, de 1º de abril de 2021 (Lei de Licitações e Contratos Administrativos), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, a fim de ampliar o alcance da regularização fundiária; e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2252589>>.

BRITO, Brenda. **Nota técnica sobre o Projeto de Lei n.º 2.633/2020**. Belém, PA: Imazon, 2020. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Imazon_Nota_Tecnica_PL2633_2020-1.pdf>.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Modelagem de sistemas ambientais**. Editora Blücher, São Paulo, 1999.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. VGeo - Visualizador de dados do DNITGeo 2022. Disponível em: <<https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>>.

FERRANTE, Lucas; ANDRADE, Maryane BT; FEARNSIDE, Philip M. Land grabbing on Brazil's Highway BR-319 as a spearhead for Amazonian deforestation. **Land Use Policy**, v. 108, p. 105559, 2021.

GONÇALVES-SOUZA, Daniel et al. The role of protected areas in maintaining natural vegetation in Brazil. **Science advances**, v. 7, n. 38, p. eabh2932, 2021.

HISSA, Letícia de Barros Viana; MÜLLER, Hannes; AGUIAR, Ana Paula Dutra; HOSTERT, Patrick; LAKES, Tobia. Historical carbon fluxes in the expanding deforestation frontier of Southern Brazilian Amazonia (1985–2012). **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 77–89, 2018. DOI: 10.1007/s10113-016-1076-2.

HOUGHTON, R. A. et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v. 7, n. 7, p. 731-746, 2001.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. PRODES – Amazônia. Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônia Brasileira por Satélite. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates>.

IPAM - INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. Florestas Públicas Não Destinadas & Grilagem. Disponível em: <[IPAM - INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA. Fraude no CAR responde por 65% do desmatamento em terras públicas da Amazônia. Disponível em: <<https://ipam.org.br/fraude-no-car-responde-por-65-do-desmatamento-em-terras-publicas-da-amazonia/>>](https://ipam.org.br/florestas-publicas-nao-destinadas-e-grilagem/#:~:text=Florestas%20p%C3%ABlicas%20n%C3%A3o%20destinadas%20%26%20grilagem,-Na%20Amaz%C3%B4nia%2C%20cerca&text=S%C3%A3o%20as%20chamadas%20florestas%20p%C3%ABlicas,pelas%20popula%C3%A7%C3%B5es%20origin%C3%A1rias%20e%20tradicionais.>></p>
</div>
<div data-bbox=)

KRUID, Sanne et al. Beyond deforestation: carbon emissions from land grabbing and forest degradation in the Brazilian Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 645282, 2021.

LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira et al. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021.

LIMA, Mendelson et al. The “New Transamazonian Highway”: BR-319 and Its Current Environmental Degradation. **Sustainability**, v. 14, n. 2, p. 823, 2022.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point: Last chance for action. **Science Advances**, v. 5, n. 12, p. eaba2949, 2019.

MOLIN, Paulo G. et al. Spatial determinants of Atlantic Forest loss and recovery in Brazil. **Landscape Ecology**, v. 32, p. 857-870, 2017.

MOUTINHO, Paulo; AZEVEDO-RAMOS, Claudia. Untitled public forestlands threat Amazon conservation. **Nature communications**, v. 14, n. 1, p. 1152, 2023.

MOUTINHO, Paulo et al. Amazônia em chamas: desmatamento e fogo em tempos de COVID-19. **Nota Técnica**, n. 4, 2020.

NUMATA, Izaya; COCHRANE, Mark A.; SOUZA JR, Carlos M.; SALES, Marcio H. Carbon emissions from deforestation and forest fragmentation in the Brazilian

Amazon. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 044003, 2011. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044003.

OLIVEIRA, A. U. et al. A grilagem de terras na formação territorial brasileira. **São Paulo: FFLCH**, 2020.

PACHECO, Andrea; MEYER, Carsten. Land tenure drives Brazil's deforestation rates across socio-environmental contexts. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5759, 2022.

PIONTEKOWSKI, Valderli Jorge et al. Modelagem do desmatamento para o Estado do Acre utilizando o programa Dinamica EGO. **Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, v. 4, p. 1064-1075, 2012.

POTENZA et al. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. Disponível em: <https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf>.

RIBEIRO, Sónia et al. **Ecologia da paisagem no contexto luso-brasileiro**: volume 1. 1.ed. Curitiba: Appris, 2021.

ROCHA, M.M.; YAMAMOTO, J.K.; WATANABE, J.; FONSECA, P.P. Studying the influence of a secondary variable in Collocated Cokriging estimates. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.84, p.335-346, 2012.

SILVA, A. de Q. Comparação dos fatores determinantes do desflorestamento nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 13., 2007, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3133-3140.

SOARES-FILHO, Britaldo S.; ASSUNÇÃO, Renato M.; PANTUZZO, Alexandre E.. Modeling the Spatial Transition Probabilities of Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier: Transition probability maps indicate where changes may occur in the landscape, thus enabling better evaluation of the ecological consequences of landscape evolution. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

SOARES-FILHO BS, RAJÃO R, MERRY F, RODRIGUES H, DAVID J, LIMA L, MACEDO M, COE M, CARNEIRO A, SANTIAGO L (2016) Brazil's Market for trading forest certificates. **Plos One** 11(4): e0152311. doi:10.1371/journal.pone.0152311"

SOARES-FILHO, Britaldo; RODRIGUES, Hermann; FOLLADOR, Marco. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, v. 43, p. 80-87, 2013.

SONTER, Laura J. et al. Local conditions and policy design determine whether ecological compensation can achieve No Net Loss goals. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 2072, 2020.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Cadastro Nacional de Florestas Públicas - Atualização 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/cadastro-nacional-de-florestas-publicas>>.

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. **NDC Registry - Brazil First NDC Second update**. Disponível em: <<https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>> .

VILELA, Thais et al. A better Amazon road network for people and the environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 13, p. 7095-7102, 2020.

ZENERATTI, Fábio Luiz. O acesso à terra no Brasil: reforma agrária e regularização fundiária. **Revista Katálysis**, v. 24, p. 564-575, 2021.