

CENÁRIOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA O DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL DO BRASIL

Andrea Santos Garcia, Rafaella Almeida Silvestrini, Alvaro Maia Batista, Lais Ferreira
Banco Mundial: Marek Hanusch, Philipp Kollenda, Carla Cristina Solis Uehara, Dieter Wang

Resumo

O desmatamento da Amazônia brasileira tem consequências graves para as mudanças climáticas e a biodiversidade em escalas globais e regionais. Neste contexto, este estudo explora cenários futuros de desmatamento, suas relações com políticas públicas e aplicação em um painel on-line disponível publicamente [<https://forestatrisk.ipam.org.br>]. Os cenários vão além das projeções de desmatamento que usam uma taxa constante ou suposições de média móvel para descrever o nível de referência histórico (HRL). Em vez disso, o cenário padrão atual (BAU) usa uma nova linha de base de negócios para prever a quantidade de perda florestal devido a fatores macroeconômicos. Em seguida, o cenário de governança simula um esforço de conservação mais robusto, em que as florestas públicas não destinadas (FPNDs) são convertidas em áreas de proteção (GOV).

O modelo foi estimado usando dados de 1999 a 2021, a validação ocorreu com dados de 2022 e as previsões da quantidade e alocação espacial do desmatamento foram realizadas para o período 2023 a 2025. Os resultados mostraram que a área total de desmatamento observada foi 32%

maior em 2022 se comparada à linha de base BAU, o que provavelmente indica uma governança florestal enfraquecida nos últimos anos. Ainda assim, encontramos uma boa correspondência de alocação espacial entre as áreas de desmatamento modeladas da linha de base BAU e as áreas de desmatamento observadas, com uma precisão espacial média geral correspondente a 80% com um tamanho de janela de 12 x 12 km e 90% com 20 x 20 km. Se o desmatamento continuasse na taxa HRL, seria acumulado 35% a mais de desmatamento até 2025 do que o estimado na linha de base BAU, indicando que as condições macroeconômicas previstas para o próximo ano são capazes de conduzir uma redução do desmatamento. Todos os modelos simulam grandes áreas de desmatamento concentradas no centro do Pará (PA) e no sul do Amazonas (AM), especialmente ao longo das estradas principais. Zonas de menores manchas de desmatamento simulado foram observadas ao longo dos limites entre o bioma Amazônia e o Bioma Cerrado, a fronteira de desmatamento mais antiga. No cenário GOV, notou-se que as áreas que deixam de ser desmatadas em FPNDs são transferidas, principalmente, para

Direitos autorais: Seção 2.1, Figuras 2 e 3, Tabelas 1 e A1, e o Apêndice são © pela Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial.

Licença CC BY 3.0 IGO. Consulte <https://openknowledge.worldbank.org/pages/terms-of-use> para o formato de atribuição necessário e avisos. Entre em contato com pubrights@worldbank.org para qualquer consulta sobre direitos e licenças.

assentamentos rurais e propriedades rurais – fenômeno conhecido como vazamento. O estudo contribui para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a quantidade de desmatamento e sua distribuição no tempo e no espaço. O modelo espacialmente explícito pode ajudar a identificar áreas de risco para respostas políticas direcionadas, bem como esclarecer onde o vazamento pode ser esperada quando os mecanismos de proteção local são aplicados.

1. Introdução

O desmatamento da vegetação nativa surgiu como um dos desafios ambientais mais significativos da atualidade. As consequências são perturbadoras em um sistema humano-ambiental acoplado, afetando uma série de serviços ecossistêmicos, incluindo perda de biodiversidade e a regulação do clima (MEA, 2005; Shukla et al. 1990). A agricultura, a silvicultura e outros usos da terra são responsáveis por 23% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo todos os anos e 49% desses GEE são emitidos anualmente no Brasil (SEEG, 2023). Ainda assim, os desmatamentos fazem parte das ações humanas que promovem atividades econômicas locais relacionadas à extração de recursos naturais, expansão da agricultura, especulação de terras, entre outras. Com a discussão sobre diferentes mecanismos para reduzir o desmatamento, mostramos como os ciclos macroeconômicos podem impulsionar a dinâmica do desmatamento e como as intervenções para a conservação podem afetar essa dinâmica.

As condições econômicas exercem influência sobre o desmatamento ao alterar os preços relativos de produtos e fatores de produção (trabalho, capital e terra). Elementos macroeconômicos, como os preços das *commodities* e as taxas de câmbio, desempenham papéis significativos nesse cenário. Preços mais elevados de *commodities* impulsionam a demanda por terras agrícolas em detrimento das florestas naturais, enquanto uma taxa de câmbio real depreciada aumenta a competitividade externa da agricultura brasileira, elevando a demanda por terras agrícolas.

Quanto à alocação espacial do desmatamento, fatores microeconômicos locais desempenham um papel crucial, conforme evidenciado por uma recente meta-análise abrangendo 320 estudos espacialmente explícitos de 1996 a 2019. Na Amazônia Legal, condições biofísicas, melhorias no acesso ao mercado (como estradas rurais), redução de custos de produção (subsídios) e questões relacionadas à posse da terra são determinantes (Cattaneo 2001, Roebeling & Hendrix 2010, Vilela et al. 2020, Banco Mundial 2021, Porcher e Hanusch 2022, Hanusch 2023, Assunção et al. 2023). Embora os fatores macroeconômicos afetem o desmatamento de maneira agregada, os fatores microeconômicos geralmente possuem dimensões espaciais mais fortes, como a qualidade variável das terras agrícolas na Amazônia e a localização das estradas. Isso ressalta que, embora as escolhas políticas sejam cruciais, o desmatamento é, em última instância, uma decisão baseada em compensações econômicas.

Nosso estudo contribui para essa literatura ao integrar um modelo de desmatamento espacialmente explícito com um modelo macroeconômico de série temporal, permitindo estimar o desmatamento contrafactual resultante de esforços políticos. Isso viabiliza a criação de uma previsão de linha de base espacialmente explícita para o desmatamento, oferecendo insights sobre a magnitude e probabilidade de futuros desmatamentos. Utilizamos essa base para análises de cenários, examinando como políticas específicas podem impactar a dinâmica do desmatamento. Estimamos nosso modelo para os nove estados brasileiros na Amazônia Legal.

Os mecanismos para reduzir o desmatamento na Amazônia foram implementados com diferentes níveis de sucesso. Políticas públicas, como o PPCDAm, demonstraram eficácia passada, envolvendo ações de comando e controle, demarcação de áreas protegidas e programas para famílias em extrema pobreza. Políticas privadas, como a moratória da soja, também contribuíram para reduções nas taxas de desmatamento.

Diante do atual contexto político brasileiro, diversos mecanismos para diminuir as taxas de desmatamento estão sendo debatidos e implementados, com discussões sobre como financiá-los. Modelos de risco de desmatamento voltados para o futuro oferecem uma abordagem para identificar fatores determinantes e dinâmicas, bem como áreas mais propensas a serem afetadas. Modelos espacialmente explícitos, como o nosso, podem auxiliar na identificação de áreas de risco, fortalecendo a eficácia no planejamento e execução de estratégias para mitigar o desmatamento.

2. Metodologia

Criamos uma linha de base de desmatamento espacialmente explícita e um cenário de política de maior proteção nas áreas florestais da Amazônia. Primeiro, estimamos uma linha de base de desmatamento que leva em conta as condições macroeconômicas (consulte a Seção 2.1.1, BAU) e, como alternativa, que usa uma referência histórica constante (consulte a Seção 2.1.2, HRL). Em seguida, alocamos espacialmente o desmatamento total esperado (consulte a Seção 2.2) e simulamos um cenário de política de maior governança da Amazônia, alterando artificialmente a alocação espacial para representar o aumento da proteção florestal em categorias específicas de terras públicas (consulte a Seção 2.4, GOV). A estrutura é dividida em duas partes principais, conforme ilustrado na Figura 1: (i) projeções baseadas em modelos para a quantidade total esperada de área desmatada no futuro e (ii) a alocação espacial do desmatamento.

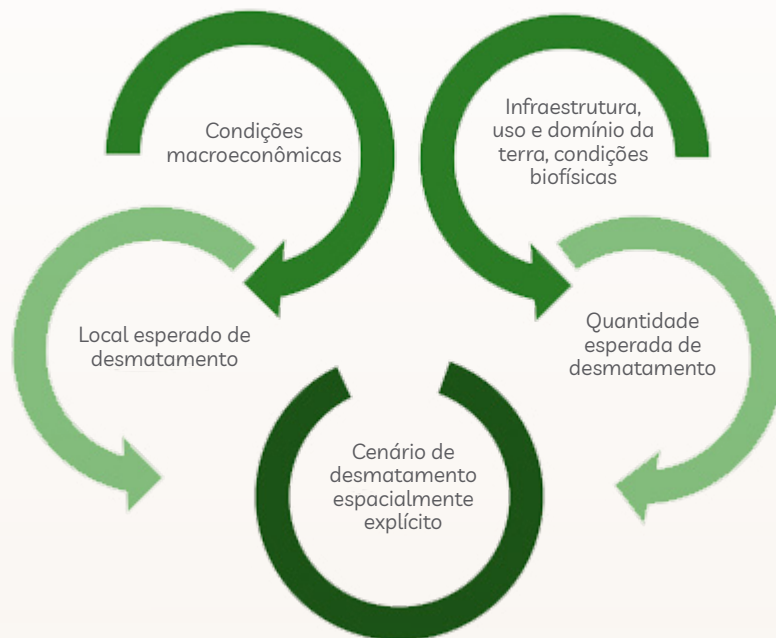


Figura 1. Fluxograma da abordagem de modelagem. No lado esquerdo, as condições macroeconômicas determinam a quantidade esperada de desmatamento. No lado direito, a distribuição espacial da infraestrutura, o uso da terra, o domínio da terra (condições de posse) e as condições biofísicas determinam onde é mais provável observar o desmatamento. As duas abordagens juntas são usadas para criar cenários espacialmente explícitos do desmatamento anual esperado.

2.1 Quantificação do desmatamento

Para quantificar o desmatamento, definimos a linha de base macroeconômica “business-as-usual” (BAU) como a quantidade esperada de desmatamento com base na relação passada entre desmatamento e condições macroeconômicas, ancorada em uma projeção macroeconômica. Os detalhes estão disponíveis em Wang et al. 2023. Devido ao seu uso generalizado, também calculamos a quantidade total de desmatamento que seria projetada com base puramente nas tendências históricas de desmatamento (HRL), sem usar informações de outras variáveis além do desmatamento passado.

2.1.1. Linha de base de negócios padrão atual (BAU)¹

O nível de desmatamento da linha de base BAU deveria representar a quantidade de desmatamento que esperaríamos que ocorresse, dadas as condições macroeconômicas exógenas ou, pelo menos, predeterminadas. A linha de base BAU deve fornecer uma estimativa do desmatamento não afetado pelos esforços das políticas, de modo que possa servir como um contrafactual para a análise de cenários e seus resíduos (desmatamento observado menos desmatamento da linha de base) possam ser interpretados como

¹ Esta subseção foi adaptada de Wang et al., 2023. Consulte-a para obter discussões adicionais, embasamento teórico e resultados intermediários.

resultado de ações de políticas. Sabemos que os esforços e intervenções de políticas, como a moratória da soja amazônica ou a atualização do código florestal, tiveram impactos significativos sobre a taxa de desmatamento. O principal desafio é, então, contabilizar adequadamente as ações políticas passadas no período de ajuste do modelo, de modo a não atribuir os resultados das ações políticas às condições macroeconômicas. Primeiro, descreveremos um modelo completo que inclui o processo de política para desenvolver a ideia e esclarecer onde precisamos fazer suposições simplificadoras para operacionalizar nosso modelo empiricamente.

Modelo completo incluindo política. Denotamos por y_t o desmatamento total no ano t na área de estudo (aqui, os nove estados brasileiros que compõem a Amazônia Legal, incluindo Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e partes do Maranhão). O modelo completo trata o desmatamento total como uma função dos resultados do desmatamento nos últimos P anos, y_{t-p} , um conjunto de K variáveis macroeconômicas exógenas com até Q defasagens, x_{t-q}^k , bem como variáveis que capturam ações políticas passadas. As políticas relacionadas ao desmatamento podem ocorrer independentemente das condições macroeconômicas, π_d ou ser funções das condições macroeconômicas, $\pi_m(x)$. Chamamos as primeiras de políticas independentes e as últimas de políticas macro induzidas. O modelo completo (1) abaixo incorpora ambos os processos de forma aditiva.²

$$y_t = c + \sum_{p=1}^P \phi_p y_{t-p} + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \beta_q^k x_{t-q}^k + \gamma \pi_m(x_t) + \delta \pi_d + v_t, \quad (1)$$

Na qual:

y_t = desmatamento observado no ano t

c = Constante

y_{t-p} = Resultado defasado do desmatamento no ano $t-p$ (com um máximo de $P=3$ defasagens)

x_{t-q}^k = Variáveis macroeconômicas exógenas no ano t e como defasagens no ano $t-q$ (com um máximo de $Q=3$ defasagens). As variáveis macroeconômicas exógenas utilizadas são os componentes principais dos preços das commodities e a taxa de câmbio real.

$\pi_m(x_t)$ = políticas macro induzidas

π_d = política independente d

v_t = resíduo no ano t

O desafio surge com as políticas macro induzidas, pois omiti-las significa que nossas estimativas de β_q^k absorveriam seus efeitos e atribuiríamos os efeitos das políticas a fatores macroeconômicos. Para considerar como nossos resultados seriam tendenciosos, diferenciamos entre dois casos em que as mudanças de política macro induzidas são positivas ou negativamente correlacionadas a fatores macroeconômicos. Para facilitar a

² Observe que, sob a premissa de que as políticas independentes π_d e as condições macroeconômicas x_t são realmente independentes, omitir π_d em nossa estimativa levaria a estimativas menos precisas, mas não distorceria nossas estimativas de β_q^k .

exposição, suponha que um aumento em x_{t-q}^k reflita as condições macroeconômicas que aumentam a pressão do desmatamento (por exemplo, um aumento nos preços globais da soja) e que um aumento em $\pi_m(x)$ reflita as mudanças nas políticas que aumentam as políticas de proteção e diminuem o desmatamento (por exemplo, uma regulamentação mais rígida do uso da terra). Ações políticas macro induzidas pró-cíclicas são aquelas em que ambos os efeitos movem os resultados do desmatamento na mesma direção. Por exemplo, se os preços globais das *commodities* diminuïrem ($x \downarrow$) e a pressão do desmatamento diminuir, os governos poderão aproveitar a oportunidade para tornar mais rígida a regulamentação do uso da terra ($\pi_m(x) \uparrow$). Essa característica contracíclica é refletida como $\partial \pi_m(x) / \partial x < 0$. O resultado é uma redução maior do desmatamento do que a prevista apenas pelas condições macroeconômicas. Por outro lado, as ações políticas induzidas por fatores macroeconômicos podem ser contracíclicas, ou seja, mover os resultados do desmatamento em direções opostas. Por exemplo, um aumento nos preços das *commodities* ($x \uparrow$) aumentaria a pressão do desmatamento, mas também poderia gerar receitas fiscais adicionais para o governo que, por sua vez, poderiam ser usadas para financiar a polícia florestal e combater o desmatamento ilegal ($\pi_m(x) \uparrow$). Nesse caso, teríamos $\partial \pi_m(x) / \partial x > 0$. Uma situação semelhante ocorreria se os governos restringissem o desmatamento para contrabalançar um aumento previsto na pressão de desmatamento decorrente de aumentos projetados nos preços das *commodities*.

Modelo simplificado que permite mudanças de nível induzidas por políticas:

É difícil que possamos avaliar se a política pró-cíclica ou contracíclica predomina em nosso período de estimativa e há uma forte suposição de que esse padrão permaneceria inalterado no futuro. Além disso, é difícil encontrar proxies para o processo de política $f(\pi_m(x)) + g(\pi_d)$, o que torna inviável a estimativa da equação 1 do modelo. Em vez disso, adotamos um modelo simplificado comum na literatura e representamos uma ação de política conhecida por meio de uma variável dummy de política $d_{t \geq s}$, que é um durante e após o ano s , quando a política relevante foi introduzida. Isso está de acordo com a forma como a literatura anterior tentou capturar os efeitos das políticas ao estimar os fatores macroeconômicos do desmatamento (por exemplo, Assunção, Gandour, Rocha 2015). Também restringimos a três o número de defasagens para o desmatamento passado e para as variáveis que refletem as condições macroeconômicas. Isso resulta em nosso modelo simplificado, a equação (2) abaixo:

$$y_t = c + \sum_{p=1}^3 \phi_p y_{t-p} + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^3 \beta_q^k x_{t-q}^k + \sum_{s \in T} \pi^s d_{t \geq s} + e_t \quad (2)$$

Na qual:

y_t = desmatamento observado no ano t

c = Constante

y_{t-p} = Resultado defasado do desmatamento no ano $t-p$ (com um máximo de $P=3$ defasagens)

x_{t-q}^k = Variáveis macroeconômicas exógenas no ano t e como defasagens no ano $t-q$ (com um máximo de $Q=3$ defasagens). As variáveis macroeconômicas exógenas utilizadas são os componentes principais dos preços das commodities e a taxa de câmbio real.

$d_{t \geq s}$ variável dummy para a política d no ano s , ativa para todos os anos $t > s$.

e_t = resíduo no ano t

Ao não diferenciar explicitamente entre $\pi_m(x)$ e π_d , é possível que nossas estimativas para β_q^k (and π^s) sofram um viés de variável omitida. Uma política de desmatamento pró-cíclica omitida levaria a um viés de alta para β_q^k e, portanto, a verdadeira linha de base do desmatamento, sem os efeitos da política, seria menor do que nossa previsão em termos absolutos: $|y_t^0| - |\hat{y}_t| < 0$. Se usarmos a diferença entre o desmatamento observado e o desmatamento contrafactual estimado, $y_t - \hat{y}_t$, como nossa medida de impacto da política, então uma política de desmatamento pró-cíclica omitida significaria que subestimamos o efeito (cíclico) da política. O argumento inverso é válido para uma política anticíclica omitida.

Dada a falta de indicadores apropriados e a brevidade dos registros de dados, temos que depender de simples variáveis dummy, $d_{t \geq s}$, para estimar a relação entre as condições macroeconômicas e o desmatamento β_q^k , que é líquido de quaisquer efeitos de política (já que a política entra por meio de nosso cenário de política). Nessa aplicação, permitimos variáveis dummy de política em 2004 (Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal), 2009 (Acordo do Gado com Desmatamento Zero) e 2012 (Lei de Proteção da Vegetação Natural atualizada). Em princípio, variáveis dummy poderiam ser inseridas para levar em conta uma redução dos esforços de política também. No entanto, neste modelo, incluímos apenas variáveis dummy de política que representam o aumento dos esforços de política.

Estimativa e dados:

O modelo 2 acima mostra a equação estimada. O desmatamento anual observado foi extraído do PRODES (TerraBrasilis, 2023), de 1999 a 2021, e é nossa variável de resultado y_t . O modelo permite a inclusão de até três defasagens do desmatamento observado. x_{t-q}^k é um conjunto de variáveis exógenas que refletem as condições macroeconômicas: a taxa de câmbio real efetiva (REER) e os componentes principais dos preços globais das commodities (carne bovina, café, soja, milho, açúcar, óleo de soja, toras de madeira de lei e minério de ferro) expressos em moeda local. A Tabela A1 no apêndice mostra os quatro primeiros componentes principais dos preços das commodities. Novamente, permitimos até três defasagens porque as mudanças nas condições macroeconômicas podem ser visíveis como desmatamento observado somente após algum tempo.

A combinação dessas variáveis e de suas variantes defasadas deixa muitos fatores de

regressão com potencial. Para manter o modelo tratável e suas percepções generalizáveis, usamos um método de seleção de variáveis (LASSO) para escolher os preditores mais relevantes. As variáveis selecionadas explicam conjuntamente cerca de 90% do desmatamento observado entre 1999 e 2021 (consulte a Tabela 1).

Tabela 1: Resultados da regressão pós-LASSO. Os resultados foram obtidos com o ajuste de um modelo de regressão linear nas variáveis selecionadas do modelo LASSO. Portanto, os erros padrão são inválidos e servem apenas a um propósito indicativo devido a questões relacionadas à inferência pós-seleção. Observe que o fato de uma variável ser selecionada pelo LASSO não implica que a variável também seja estatisticamente significativa.

Grupo	Preditor	Lag	Coef.	S.E.	t-stat	p-val
	Desmatamento	t - 1	0.605	0.150	4.026	0.001
Macroeconômico Commodities	Alog (REER)	t - 1	-0.237	0.141	-1.677	0.114
	Principal comp.2	t - 1	0.191	0.090	2.127	0.050
	Principal comp.4	t - 1	0.170	0.090	1.883	0.079
Dummies	De 2004 em diante	-	-0.028	0.053	-0.523	0.608
	De 2009 em diante	-	-0.093	0.070	-1.333	0.202
	De 2012 em diante	-	-0.004	0.060	-0.073	0.943
	Constante	-	1.659	0.638	2.600	0.020
	R-quadrado	-	93,7%	-	-	-
	R-quadrado adj.	-	90,8%	-	-	-
	F-stat.	-	31.997	-	-	-
	Prob (F-stat.)	-	0.000	-	-	-
	Observações	-	23	-	-	-

A Figura 2 mostra o desmatamento esperado (distribuições azuis) de acordo com o modelo de 1999 a 2021, juntamente com o desmatamento observado (barras verdes e vermelhas). Os efeitos da taxa de câmbio real efetiva (REER), que aumentou de seu ponto mais baixo de 42 em 2004 e atingiu o pico de 109 em 2011³, são visíveis no gráfico, pois o desmatamento esperado devido às condições macroeconômicas diminuiu drasticamente. Observe que ainda há diferenças entre o desmatamento observado e o esperado porque nosso modelo não leva em conta todos os efeitos de políticas que podem ter conseguido manter o desmatamento abaixo dos níveis esperados (ou que não conseguiram fazê-lo).

³ Observação: a REER é indexada a 100 em 2020. Consulte os Índices de Taxa de Câmbio Efetiva do BIS.

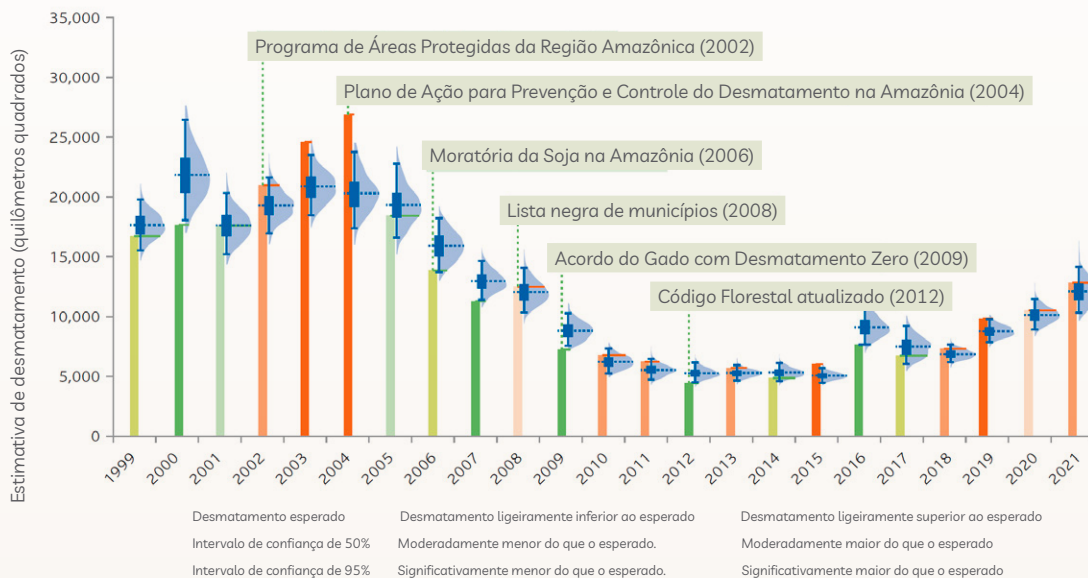


Figura 2. O desmatamento observado de 1999 a 2021 é mostrado nas barras. As cores representam se o desmatamento é menor ou maior do que o esperado de acordo com o modelo macroeconômico. A distribuição azul é o desmatamento esperado de acordo com o modelo.

Para construir uma linha de base macroeconômica para a quantidade total de desmatamento no futuro próximo, usamos previsões macroeconômicas do Modelo Macro-Fiscal (MFMod) do Banco Mundial, conforme discutido em (Burns et al., 2019).⁴ Como essas previsões macroeconômicas só estão disponíveis até três anos futuros, restringimos nosso cenário a 2022-2025. O Banco Mundial atualiza as projeções de três anos a cada seis meses e as publica por meio da série Macro Poverty Outlook series.⁵ Usamos os coeficientes da equação (1) com valores previstos para a REER e os preços globais de commodities para projetar o desmatamento de 2022 a 2025. A Figura 3 mostra a gama de possíveis resultados de desmatamento. Para cada ano, usamos o valor médio para as próximas etapas de nossa análise.

⁴ Usamos as estimativas pontuais das previsões, negligenciando, assim, como a incerteza nas previsões macroeconômicas se propagaria para a incerteza em nossas estimativas de desmatamento. Pesquisas futuras poderiam abordar essa questão fornecendo cenários diferentes, por exemplo, para condições macroeconômicas fortes ou fracas.

⁵ <https://www.worldbank.org/en/publication/macro-poverty-outlook>

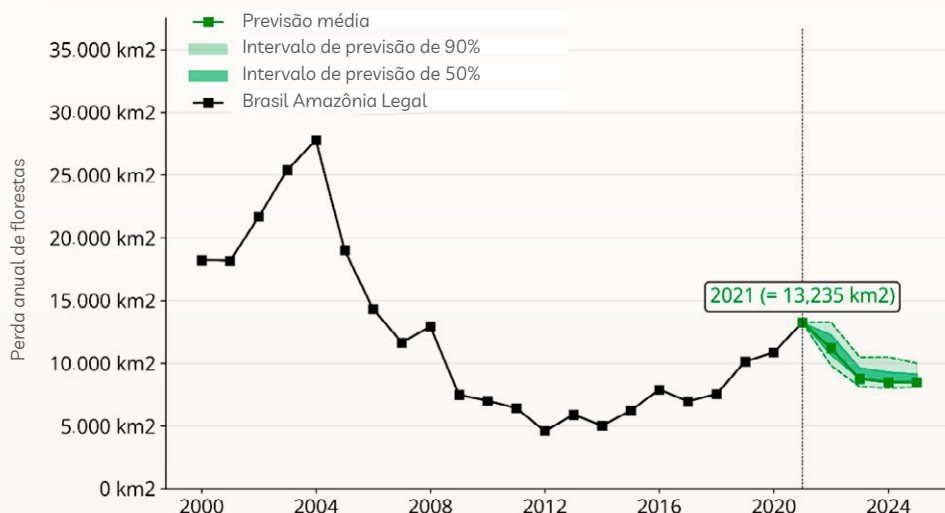


Figura 3. As previsões são formadas pelo ajuste do modelo de benchmarking com base nas condições macroeconômicas (Equação 1) e pelo uso das condições macroeconômicas previstas para prever as taxas anuais de desmatamento na Amazônia Legal brasileira. A previsão média (linha verde escura) representa o cenário BAU. Os intervalos de previsão mostram a probabilidade de resultados alternativos.

2.1.2 Nível de referência histórico (HRL)

Devido ao seu uso generalizado, incluímos a maneira mais simples de construir uma linha de base para o desmatamento esperado em nossa análise como uma comparação: presumir que o desmatamento continua na mesma taxa do(s) ano(s) mais recente(s) com dados disponíveis. Por exemplo, os níveis de referência florestal do Fundo Amazônia ou do CONAREDD+ / REDD+ usam médias móveis que são atualizadas a cada cinco anos. Em nossa aplicação, consideramos apenas o futuro próximo até 2025, portanto, para aplicar esse método, presumimos que o desmatamento continua em 2022-2025 como em 2021 e 2022 (o que significa 12.250 km² de acordo com o PRODES).

2.2 Alocação espacial do desmatamento

A alocação do desmatamento é resultado de modelos que usam a distribuição espacial da probabilidade de áreas desmatadas e processos de expansão e criação de manchas de desmatamento. O modelo foi parametrizado com base nas mudanças de paisagem ocorridas entre 2017 e 2020. Uma lista de variáveis é mostrada na Tabela 2, incluindo variáveis ambientais (biológicas e físico-químicas), domínio da terra, infraestrutura, regularização ambiental, socioeconômicas e uso da terra. Todo o modelo de alocação foi implementado na plataforma DINAMICA EGO (Soares-Filho et al., 2013, www.dinamica-ego.com).

Realizamos uma extensa pesquisa na literatura para identificar variáveis relacionadas à ocorrência de desmatamento, resultando na construção e teste de 38 variáveis para entender a dinâmica desse fenômeno. A relevância dessas variáveis foi avaliada não apenas para a Amazônia Legal brasileira como um todo, mas também para duas regiões específicas: a primeira abrangendo os estados do Acre, sudoeste do Amazonas e norte de Rondônia (conhecida como AMACRO), e a segunda entre o sul do Pará e o norte do Mato Grosso.

Essas regiões apresentam distinções marcantes em termos de características físicas, químicas, produção agrícola e fatores socioeconômicos, resultando em diferentes relações entre a conversão da vegetação nativa e as variáveis explicativas. As variáveis escolhidas para integrar o modelo são detalhadas na Tabela 2, sendo selecionadas com base em sua relevância para a dinâmica do desmatamento e na menor correlação com outras variáveis escolhidas. Este cuidadoso processo de seleção visa assegurar a precisão e robustez do modelo na compreensão da complexa interação entre as variáveis e o desmatamento nessas regiões distintas.

Tabela 2. Variáveis selecionadas usadas para modelar a probabilidade de mudança. A região de interesse está dividida em todo o Bioma Amazônico, AMACRO (estados do Acre, sudoeste do Amazonas e norte de Rondônia) e PA/MT (sul do Pará e norte do Mato Grosso).

Região de interesse	Tipo de variável	Variáveis
Amazônia	Infraestrutura	Distância de estradas e rodovias (IMAZON Geo, 2023; DNIT, 2023)
Amazônia	Infraestrutura	Distância para áreas urbanas (IBGE, 2023)
Amazônia	Infraestrutura	Distância para vilas ou assentamentos rurais (IBGE, 2023)
Amazônia	Land use	Distância para áreas desmatadas nos últimos dois anos da série temporal
Amazônia	Meio ambiente	Adequação para agricultura (Pires, 2014)
Amazônia	Meio ambiente	Declive (SRTM, 2023)
Amazônia	Domínio da terra	Classe de posse da terra (IPAM - material interno)*
AMACRO	Meio ambiente	Densidade de carbono (MCTI, 2021)
MT/PA	Meio ambiente	Altitude do terreno (SRTM, 2023)

* Propriedades Rurais, Assentamentos Rurais, Unidades de Conservação de Uso Restrito, Unidades de Conservação de Uso Sustentável, Floresta Pública Não Designada, Terra Indígena - Homologada, Terra Indígena - Não Homologada, Povos e Comunidades Tradicionais, Outras Terras Públicas, Sem Dados.

A probabilidade de mudança foi calculada mediante a aplicação do método Bayesiano de pesos de evidência, conforme proposto por Bonham-Carter (1994). Esse método utiliza probabilidades condicionais para estabelecer a relação entre a presença/ausência de mudança e a presença/ausência de fatores específicos. A técnica de pesos de evidências emprega relações estatísticas entre diversas camadas de informações (evidências) e casos conhecidos de desmatamento para descrever e analisar as interações entre os dados espaciais (variáveis).

Ao simular cenários de governança nos quais se espera que uma determinada área se torne mais protegida, os pesos podem ser ajustados artificialmente para reproduzir os efeitos desejados. Posteriormente, a simulação das mudanças é realizada integrando as taxas de transição (quantificação do desmatamento) com as probabilidades espaciais de mudança. Para operar a alocação das mudanças quantificadas, utilizam-se os autômatos celulares *patcher* e *expander*. O *patcher* cria novas áreas de desmatamento por meio de um mecanismo de semeadura, enquanto o *expander* amplia as áreas já existentes (Leite-Filho et al., 2020).

Cada município foi abordado individualmente no modelo de alocação. A aderência de cada variável apresentada na Tabela 2 foi avaliada separadamente para cada município, e aquelas que não demonstraram significância foram excluídas do modelo aplicado a esse município específico. Os resultados dos modelos para cada município foram consolidados em um resultado único para toda a Amazônia. Este rigoroso processo de análise individualizada contribui para a precisão e relevância dos resultados globais obtidos.

2.3 Cenário de governança (GOV)

O desmatamento na Amazônia está relacionado tanto a fatores econômicos quanto a questões de governança. Embora a linha de base do BAU leve em conta os fatores (macro) econômicos, queremos destacar a importância da governança por meio da modelagem de cenários de políticas. Desenvolvemos um cenário de governança ambiental (GOV) que mostra possíveis desvios da linha de base do BAU. Especificamente, modelamos o que aconteceria se todas as florestas públicas não designadas (NDPFs) fossem atribuídas a unidades de conservação. Fazemos isso alterando o modelo de alocação de modo que as florestas públicas não designadas (NDPF) recebam as mesmas probabilidades de alocação de desmatamento que as Unidades de Conservação.

O cenário GOV influencia a alocação do desmatamento em nível local dentro de cada município. Se ele também diminui, o desmatamento no agregado depende da quantidade de desmatamento que é deslocada para áreas vizinhas dentro do mesmo município. A extensão desse vazamento a outras áreas pode ser capturada pela elasticidade de vazamento. Neste documento, fornecemos uma gama de possíveis resultados de cenários com base em dois valores extremos para a elasticidade de vazamento.

Primeiro, uma elasticidade de vazamento de 1 pressupõe que todo o desmatamento evitado nas NDFPs é deslocado para outro lugar e o desmatamento agregado total permanece o mesmo. Denotamos essa variante do cenário de governança como GOVlq (lq=leakage). Em segundo lugar, uma elasticidade de vazamento de 0 pressupõe que nenhum desmatamento é deslocado para outras áreas e a quantidade de desmatamento em células de grade que não são NDFPs permanece constante. Isso significa que o desmatamento agregado total diminuirá proporcionalmente à diminuição das NDFPs. Denotamos essa variante do cenário de governança como GOVdr (dr=decrease). Obviamente, as duas variantes extremas do cenário não são realistas, mas ilustram a gama de resultados da implementação de uma política pública territorial. Observe que não se presume que o desmatamento nas NDFPs seja zero em nenhuma das variantes do cenário. Em vez disso, outras variáveis nos NDFPs podem ser diferentes das áreas protegidas (por exemplo, distância de estradas, assentamentos ou desmatamento anterior) e exercer pressão de desmatamento suficiente para que o modelo ainda simule que algum desmatamento ocorreria nos NDFPs, mesmo depois de atribuir a eles a mesma proteção das unidades de conservação. Nesses casos, os algoritmos *patcher* e *expander*, que alocam o desmatamento espacialmente, não conseguem alocar a quantidade de desmatamento somente fora dos NDFPs, porque as taxas de desmatamento esperadas são altas e as manchas florestais disponíveis não são suficientemente abundantes ou apresentam resistência ainda maior ao desmatamento. Além disso, historicamente, houve algum desmatamento em áreas protegidas, de modo que a probabilidade básica de desmatamento para unidades de conservação também não é 0.

2.4 Validação do Modelo

Validamos o modelo comparando os resultados da linha de base macroeconômica BAU com os dados observados de 2022 usando quatro métricas: (i) a quantidade de desmatamento prevista e observada, (ii) a similaridade espacial entre mapas observados e simulados de acordo com diferentes tamanhos de janela (método de similaridade fuzzy), (iii) a concordância espacial entre mapas observados e simulados em uma grade de 12 km x 12 km e 20 km x 20 km, e (iv) a concordância analisada entre mapas observados e simulados em nível de município.

Comparamos a quantidade de desmatamento prevista pela linha de base BAU e a quantidade de desmatamento detectada pelo PRODES em 2022 (TerraBrasilis, 2023). Para obter a precisão espacial média geral dos mapas simulados, calculamos a similaridade espacial entre os mapas observados e simulados de acordo com diferentes tamanhos de janela, conhecido como método de similaridade Fuzzy (Soares-Filho et al., 2013). Esse método leva em conta os erros de comissão e omissão com o aumento da janela de 1 célula (resolução espacial de 0,5 km) para 41 células (resolução espacial de 20,5 km) (Silvestrini et al., 2011). Em seguida, buscando entender a precisão do modelo em escala local, mapeamos a concordância espacial em uma grade de 12 km x 12 km e uma grade de 20 km x 20 km comparando o

desmatamento detectado pelo PRODES em 2022 e o desmatamento simulado. Em nível municipal, comparamos o desmatamento detectado pelo PRODES em 2022 e o desmatamento simulado usando valores absolutos e proporcionais. Os valores proporcionais sugerem a capacidade do modelo de capturar a dinâmica do desmatamento, mesmo que a quantidade absoluta de desmatamento simulado não seja a mesma. Por fim, comparamos a lista de municípios que foram mais desmatados nos mapas simulados e observados.

3. Resultados e Discussão

3.1 Precisão da previsão da linha de base do BAU

Para 2022, nossa linha de base BAU previu uma redução do desmatamento em comparação com o nível de 2021, o que de fato observamos nos dados obtidos. Entretanto, embora nossa linha de base BAU tenha previsto uma área desmatada de 9.619 km², o desmatamento real (de acordo com o PRODES) foi de 12.695 km² em 2022 (TerraBrasilis, 2023). Isso representa 32% mais desmatamento do que o estimado, provavelmente refletindo a governança florestal enfraquecida em 2022 e nos anos imediatamente anteriores. A literatura tem apontado que, de fato, as políticas ambientais brasileiras foram enfraquecidas desde 2016, afetando áreas já protegidas e principalmente Áreas Públicas Não Designadas (Azevedo-Ramos et al., 2020; Carvalho et al., 2022; Coelho-Junior et al., 2022; Silva Junior et al., 2023).

A similaridade espacial (fuzzy) média geral correspondeu a 80% em uma janela de 12 x 12 km e 90% em uma janela de 20 x 20 km, representando uma boa correspondência entre o desmatamento observado e o simulado (veja apêndice, figura A1). Esse padrão também é mostrado na Figura 4, com uma parte significativa do mapa mostrando concordância entre o desmatamento observado e o simulado.

As diferenças locais entre o desmatamento observado e o simulado estão concentradas na área central do Estado do Amazonas (AM), no noroeste do Estado de Roraima (RR) e no sudoeste do Estado do Pará (PA). Atribuímos essa diferença a duas novas dinâmicas que provavelmente não foram capturadas por nossos modelos devido ao período de defasagem entre a calibração do modelo e a criação do cenário. Primeiro, nos últimos dois anos, as florestas no interior do Estado do Amazonas - o maior bloco de floresta densa na região amazônica - sofreram um aumento significativo nas taxas de desmatamento. Essas florestas costumavam ter um desmatamento insignificante antes de 2020, mas estão rapidamente se tornando uma nova fronteira de desmatamento. Segundo, um novo padrão de aumento do desmatamento surgiu em áreas protegidas e florestas públicas não designadas (NDPF) nos estados de Roraima e Pará (Alencar et al. 2022). Além disso, o aumento na magnitude do desmatamento em áreas públicas também é uma dinâmica mais recente (Alencar et al. 2022).

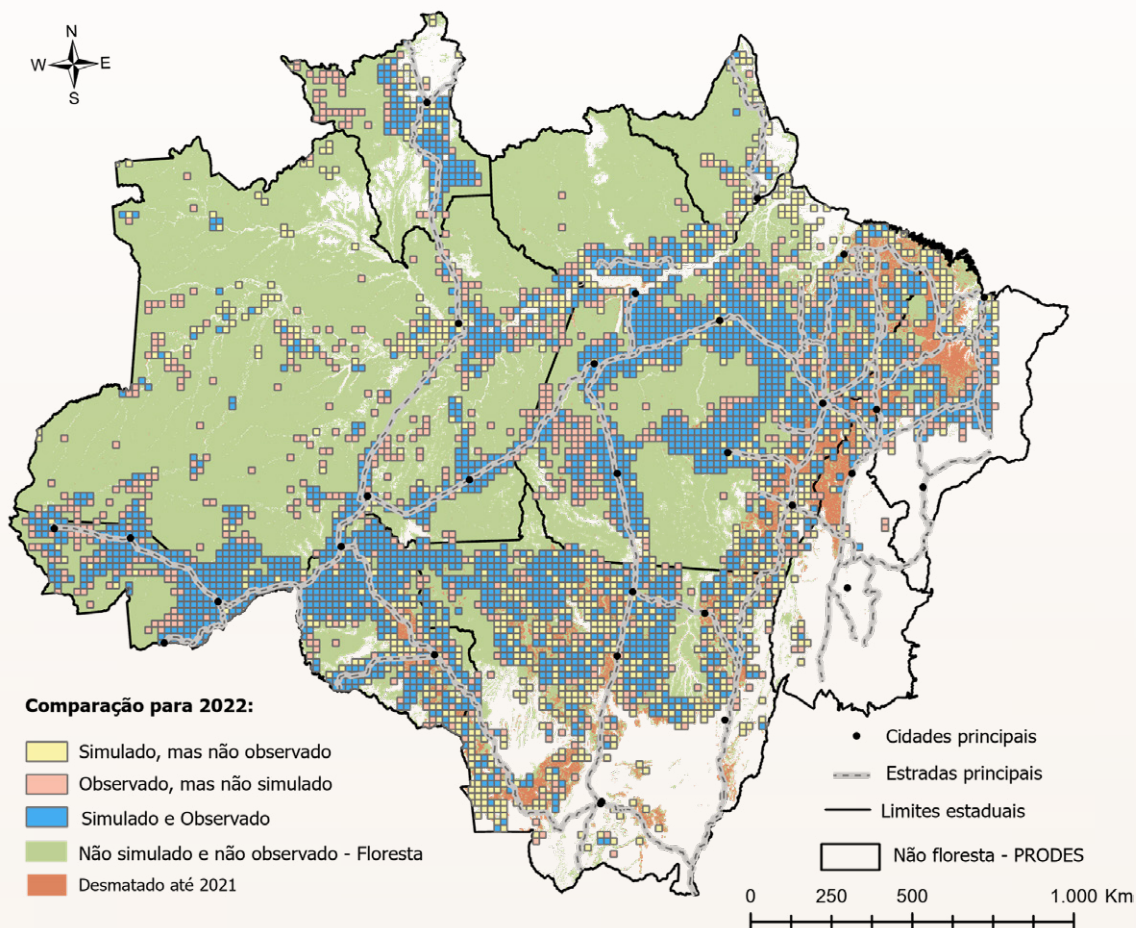


Figura 4: Concordância espacial em uma grade de 20 km x 20 km, comparando o desmatamento simulado (linha de base macroeconômica BAU) e observado (PRODES) em 2022.

Os 30 municípios que mais desmataram somaram 61% da área total desmatada na Amazônia Legal brasileira de acordo com o desmatamento observado pelo PRODES em 2022 (TerraBrasilis, 2023). Considerando o valor absoluto do desmatamento, esses municípios estão principalmente nos estados do Amazonas (Apuí, Lábrea), Pará (Altamira, São Felix do Xingu) e Rondônia (Porto Velho). A maior parte do desmatamento também foi prevista nesses 30 municípios no cenário BAU, incluindo os cinco principais municípios do Amazonas, Pará e Rondônia. Além disso, 25 desses 30 municípios também são apresentados no grupo de municípios mais desmatados no cenário BAU de linha de base e no cenário GOV. Ainda assim, a diferença entre o desmatamento observado e simulado na linha de base do BAU foi superior a 50% em 13 municípios - principalmente nos estados do Amazonas (Apuí, Lábrea, Manicoré, Nova Aripuanã), Pará (Itaituba, Portel) e Mato Grosso (Colniza, Nova Bandeirante).

3.2 Comparações entre a linha de base BAU e o cenário GOV

As estimativas de 2022 destacam a força da linha de base macroeconômica do BAU em relação à extrapolação de valores históricos (o nível de referência histórico, ou HRL). A linha de base BAU leva em conta a redução esperada no desmatamento devido às condições macroeconômicas que desincentivaram o desmatamento e mostra que, embora a quantidade de desmatamento em 2022 (11.594 km²) tenha sido menor do que em 2021 (13.038km²), a governança florestal enfraquecida pode ter levado a um desmatamento maior do que o esperado.

Com uma suposição de taxa constante, preveríamos resultados de desmatamento particularmente ruins de 2022 a 2025, acumulando quase 50.000 km². Em comparação, a linha de base macroeconômica BAU acumularia 37.000 km² de área desmatada até 2025 - 26% a menos do que o nível de referência histórico (Figura 5). Voltando ao cenário de governança, o desmatamento acumulado esperado entre 2022-2025 varia entre 31.728 km² e 37.000 km², dependendo se assumimos nenhum ou total vazamento.

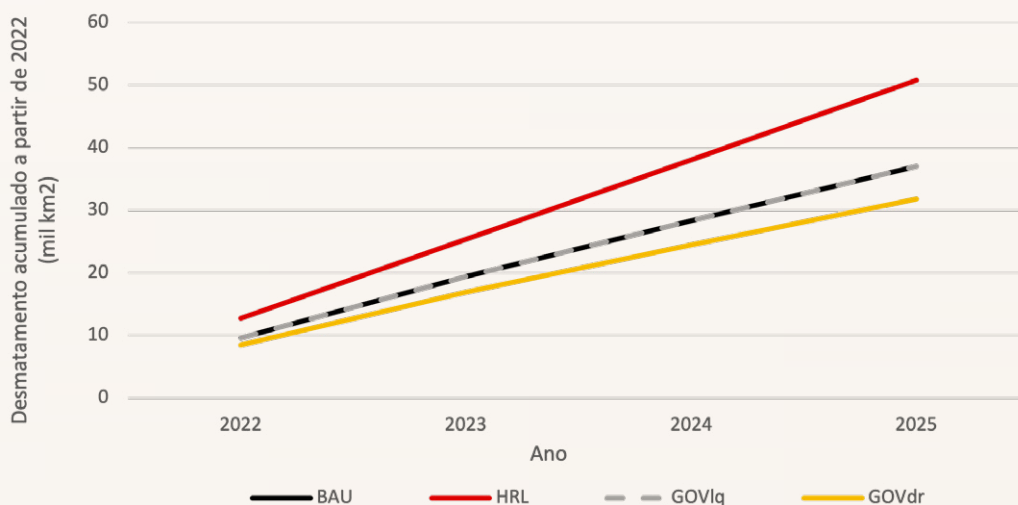


Figura 5. Desmatamento acumulado de 2022 a 2025: Nível de referência histórico (HRL), Macroeconômico Business as usual (BAU) e Governança com vazamento total (GOVlq) e sem vazamento (GOVdr). Não há diferença entre BAU e GOVlq, pois eles diferem apenas no aspecto da alocação.

A distribuição espacial do desmatamento simulado de 2022-2025 para os três modelos é mostrada na Figura 6. Em geral, os valores mais altos de desmatamento (> 75 km² em uma célula de 400 km²) estão mais concentrados no centro do Pará (PA) e no sul do Amazonas (AM), especialmente ao longo das estradas principais. Valores mais baixos (< 25 km²) foram observados de forma generalizada ao longo da fronteira entre os biomas Amazônia brasileira e Cerrado, região frequentemente chamada de Arco do Desmatamento. Essa região é a mais antiga fronteira de desmatamento na Amazônia brasileira, com floresta altamente fragmentada. Assim, todos os modelos simularam o desmatamento em pequenas áreas em toda a região.

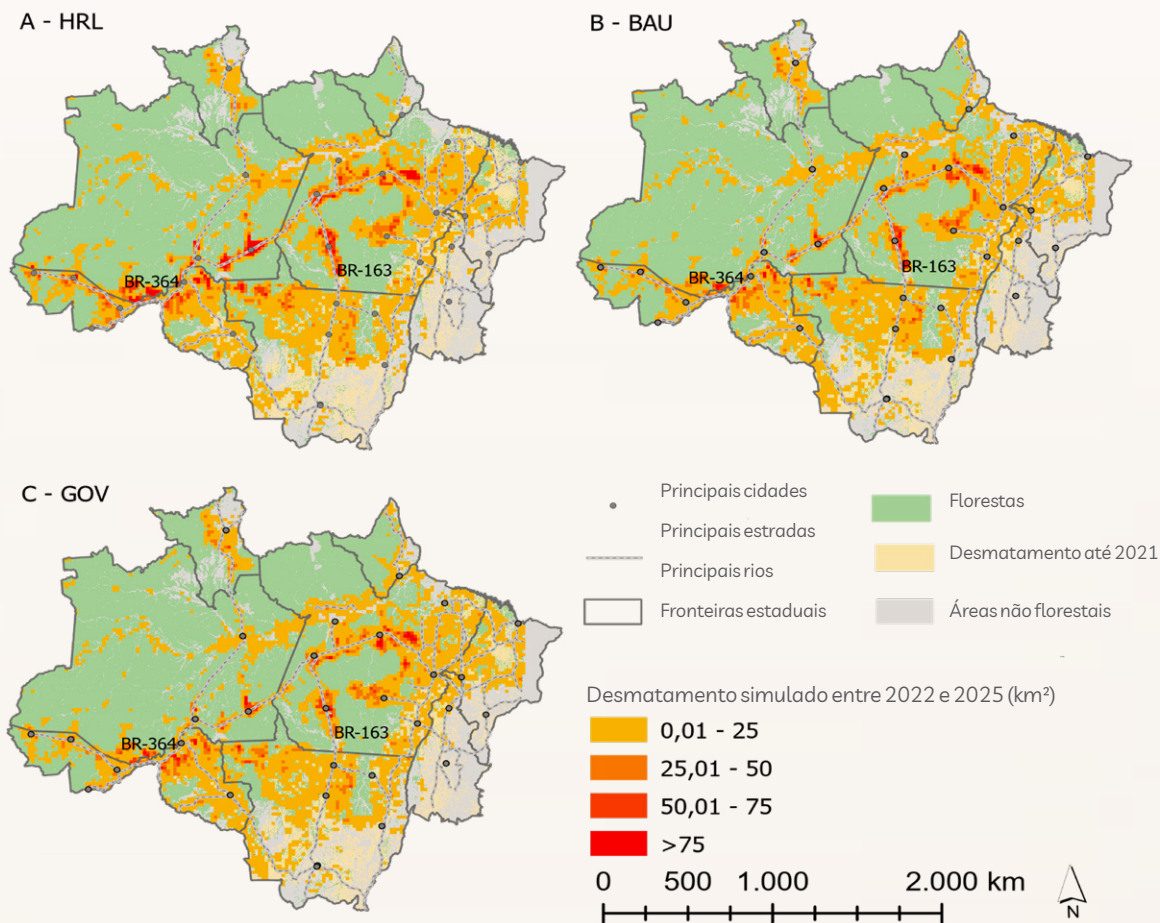


Figura 6. Desmatamento simulado de 2022-2025 em grades de 20 x 20 km (célula de 400 km²) para cada modelo: A) Suposição de taxa constante; B) Linha de base macroeconômica BAU; C) Cenário de governança (Gov-none e GOV-full).

Em linha com o maior acúmulo de desmatamento total, a projeção de taxa constante também mostra mais grades com mais de 75 km² de desmatamento do que a linha de base BAU e o cenário GOV. As diferenças entre BAU e GOV só podem ser vistas em níveis locais, especialmente ao longo da BR-163 (sul do Pará) e BR-364 (sul do Amazonas (AM), próximo aos estados do Acre (AC) e Rondônia (RO)). Essas são regiões em que uma quantidade significativa de desmatamento ocorreu em florestas públicas não designadas (NDPFs). A Figura 7 mostra um exemplo de como o modelo simula o desmatamento em todos os três cenários diferentes em relação às NDPFs em uma escala fina: BR 163, Sul do Pará. Com níveis de referência históricos e a linha de base BAU, as NDPFs são desmatadas de acordo com os padrões históricos, resultando em uma área desmatada de cerca de 995 km² entre 2022-2025 na região destacada (Figura 7-A e 7-C). No cenário em que as NDPFs são convertidas em terras protegidas, o desmatamento diminui para 553 km² nessas áreas (Figura 7-B).

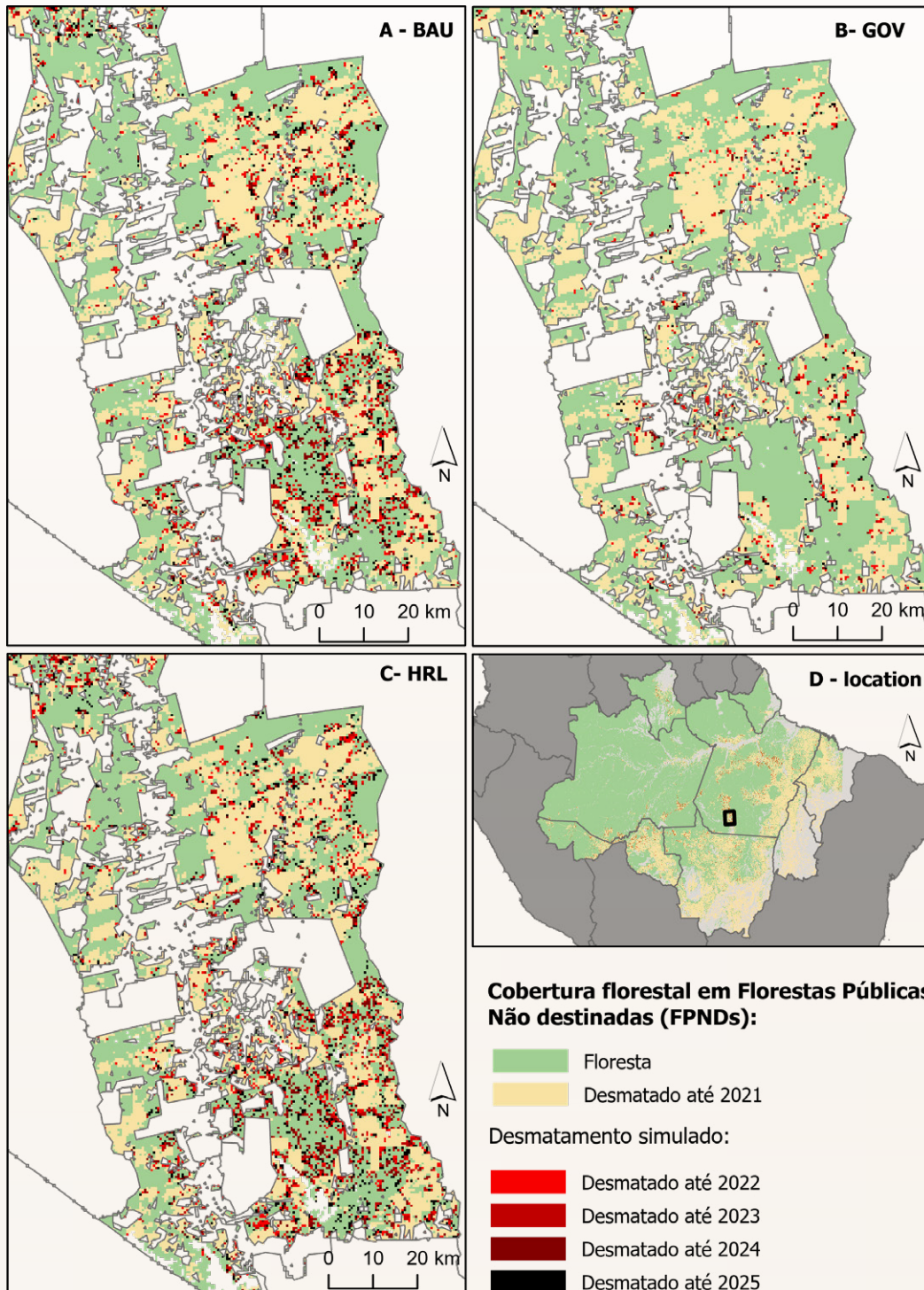


Figura 7. Desmatamento em NDPF (florestas públicas não designadas) em uma área de zoom no sudeste do estado do Pará entre os modelos: A) Linha de base macroeconômica BAU; B) Cenário de governança; C) Projeção de taxa constante; D) Localização da área de zoom.

Entre as terras públicas, as florestas públicas não designadas (FPND) foram as mais desmatadas nas projeções de taxa constante e na linha de base BAU, representando cerca de 25% do desmatamento total no período. Esse padrão tem sido relatado na literatura nos últimos anos (Azevedo-Ramos et al., 2020, Alencar et al. 2022). O cenário GOV projeta quase 57% menos desmatamento nas FPNDs do que a linha de base BAU, quando essas áreas são definidas para se comportarem de forma semelhante às áreas protegidas.

É instrutivo analisar quais áreas fora dos FPNDs teriam níveis crescentes de desmatamento quando fazemos a suposição (extrema) de que há um vazamento total da área. Isso pode nos ajudar a entender os efeitos colaterais indesejados do aumento da proteção local e revelar onde os futuros padrões de desmatamento provavelmente se manifestarão. O vazamento total significa que o desmatamento total na linha de base BAU e no cenário GOVlq é o mesmo, o desmatamento aumenta em outras categorias de posse de terra para compensar a redução nos FPNDs. As classes com os maiores aumentos no desmatamento são assentamentos rurais (42%), propriedades rurais (21%), unidades de conservação (14%) e áreas de proteção ambiental (12%). A Figura 8 mostra a distribuição do vazamento entre essas classes. O vazamento para áreas protegidas, como unidades de conservação, foi observado em municípios com pressão de desmatamento já alta quando esses municípios tinham FPNDs se tornando mais protegidos. No entanto, os assentamentos rurais e as propriedades rurais concentraram a maior parte do desmatamento em todos os cenários, seguidos pelas FPNDs.

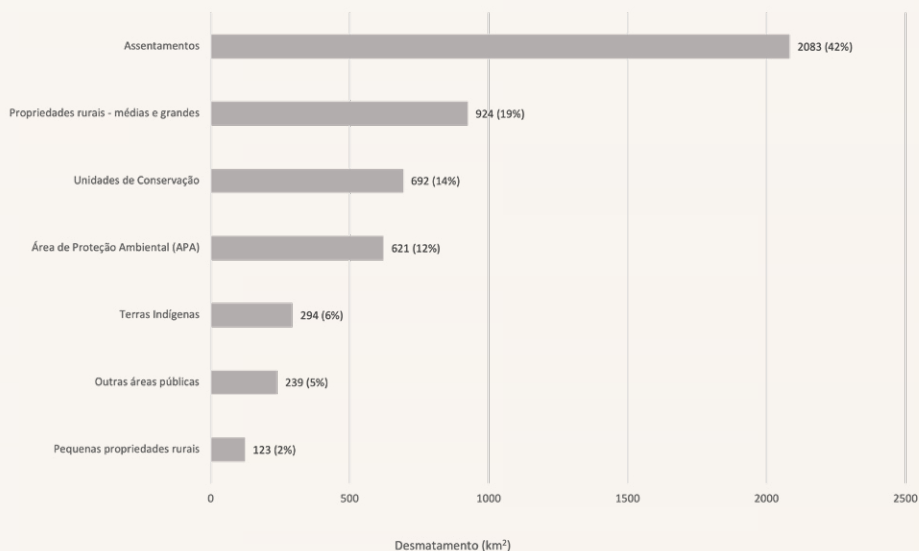


Figura 8. Efeito de vazamento ao aumentar a proteção em florestas públicas não designadas (NDPF) para outras classes de posse de terra. Os números representam a área que seria desmatada nesse cenário para cada classe de posse de terra (km²).

Conclusão e Aplicações

O desmatamento é o resultado de muitos fatores inter-relacionados, incluindo fatores socioeconômicos, políticas de uso da terra, desenvolvimento de infraestrutura e demandas do mercado global. A modelagem do risco de desmatamento nos permite entender melhor como diferentes fatores afetam a dinâmica espaço-temporal desse processo. Prever a quantidade e onde é mais provável que ocorra o desmatamento no espaço é essencial para criar e implementar mecanismos eficazes para evitar o desmatamento.

Este estudo mostra dois fatores importantes que interferem no desmatamento: os ciclos macroeconômicos e a governança na forma de designação de florestas públicas para áreas protegidas. Os ciclos macroeconômicos podem influenciar as decisões de uso da terra, a alocação de recursos e até mesmo o ambiente regulatório, impactando o risco geral de desmatamento. No entanto, a simulação de cenários em que a floresta pública seria designada para áreas protegidas mostra como o desmatamento é realocado em comparação com cenários em que a floresta pública permanece sem designação. Esse padrão de deslocamento, geralmente chamado de vazamento, é esperado quando os fatores gerais de desmatamento não são tratados em conjunto.

Pesquisas futuras poderiam se basear em nossos resultados iniciais sobre vazamento de desmatamento para entender melhor como os fatores microeconômicos influenciam onde é mais provável que ocorra o vazamento de desmatamento. Aqui, a Figura G fornece um ponto de partida para observar quais categorias de posse de terra absorvem a maior parte do vazamento (simulado). Uma melhor compreensão dos efeitos do vazamento também ajudaria a informar as discussões de políticas sobre a melhor forma de abordar e evitar que o desmatamento vaze de florestas recém-protegidas para áreas vizinhas. Além disso, estimar uma elasticidade de vazamento que dependa de fatores microeconômicos locais (por exemplo, acesso a estradas e categorias de posse de terra de áreas vizinhas) e efeitos de equilíbrio geral (por exemplo, redução da oferta de terra e aumentos associados nas pressões de desmatamento) poderia reduzir significativamente a gama de resultados prováveis para qualquer cenário de política e melhorar nosso método de usar duas suposições extremas de vazamento total ou nenhum vazamento.

A Seção 2.1.1 mostra, por meio de um modelo teórico, como a intervenção política e as condições macroeconômicas podem estar relacionadas. Operacionalizamos esse modelo para nossa análise incluindo variáveis de política, como é padrão na literatura. No entanto, reconhecemos a limitação dessa abordagem na contabilização da correlação não observada no momento e no rigor da intervenção política com as condições macroeconômicas e discutimos possíveis vieses no final da Seção 2.1.1. Pesquisas futuras poderiam aprimorar nossa abordagem identificando substitutos robustos para o processo de política que contenham mais informações do que as variáveis dummy.

Os mecanismos para evitar o desmatamento que abordam várias partes da intrincada dinâmica do desmatamento são fundamentais para reduzir a degradação do ecossistema e a perda de biodiversidade. Diferentes instrumentos para financiar esses mecanismos foram implementados, como certificação e iniciativas baseadas no mercado, Pagamento por Serviços Ecossistêmicos (PES), Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), fundos públicos e privados. Quase todos os instrumentos que permitem a implementação de mecanismos em larga escala são projetados com uma abordagem baseada em resultados. Uma versão refinada de modelos como o apresentado aqui poderia ser usada para apoiar a computação dos desempenhos dentro desses mecanismos.

Um painel [<https://forestatrisk.ipam.org.br>] que traz todos os resultados mostrados aqui é fornecido pelo IPAM e pelo Banco Mundial, onde os usuários podem analisar melhor a diferença entre os cenários para regiões específicas por meio de gráficos e mapas.

Agradecimentos

Agradecemos o esforço da Profa. Dra. Maria Victoria Ballester na revisão desta nota, bem como seus valiosos comentários. Esta nota se beneficiou dos comentários recebidos como parte de uma Reunião Virtual de Revisão de Aprimoramento da Qualidade presidida por Oscar Calvo-Gonzales. Agradecemos aos revisores Diego Herrera, Francis Dennig e Thales A.P. West, bem como a Stephane Hallegatte, por seus comentários construtivos e detalhados.

Referências Bibliográficas

Alencar, A.; Silvestrini, R.; Gomes, J.; Savian, G. 2022. Amazônia em chamas: o novo e alarmante patamar do desmatamento na Amazônia. Nota Técnica nº9, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Available at <https://ipam.org.br/bibliotecas/amazonia-em-chamas-9-o-novo-e-alarmante-patamar-do-desmatamento-na-amazonia/> [accessed on Jun 8, 2023].

Arcand, J.L.; Guillaumont, P.; Jeanneney, S.G. 2008. Deforestation and the real exchange rate. *Journal of Development Economics*, 86(2), 242–262. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2007.02.004.

Assunção, J., Gandour, C., & Rocha, R. (2015). Deforestation slowdown in the Brazilian Amazon: Prices or policies? *Environment and Development Economics*, 20(6), 697-722. doi:10.1017/S1355770X15000078

Assunção, Juliano & Carlquist Rabelo De Araujo, Rafael & Amorim Braganca, Arthur, 2023. "The Effects of Transportation Infrastructure on Deforestation in the Amazon : A General Equilibrium Approach," Policy Research Working Paper Series 10415, The World Bank.

Azevedo-Ramos, C.; Moutinho, P.; Arruda, V.L.S.; Stabile, M.C.C.; Alencar, A.; Castro, I.

Ribeiro, J.P. 2020. Lawless land in no man's land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 99, 104863. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104863

Bonham-Carter, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS*. 398 p. Oxford: Pergamon.

Busch, J., & Ferretti-Gallon, K. 2023. What Drives and Stops Deforestation, Reforestation, and Forest Degradation? An Updated Meta-analysis. *Review of Environmental Economics and Policy*, 17(2), 217-250. DOI: 10.1086/725051

Burns, A.; Campagne, B.; Jooste, C.; Stephan, D.; Bui, T.T. 2019. *The World Bank Macro-Fiscal Model Technical Description*. World Bank Group. Available at <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32217> [accessed on Jun 8, 2023].

Carvalho, R.; Coelho-Junior, M.G.; Valdiones, A.P.; Silgueiro, V; Thuault, A. 2022. Lack of transparency and social participation undermine the fight against deforestation in Brazil. *Journal of the Geographical Society of Berlin*, 153(1), 65-69. DOI: 10.12854/erde-2022-605

Cattaneo, A. 2001. Deforestation in the Brazilian Amazon: Comparing the Impacts of Macroeconomic Shocks, Land Tenure, and Technological Change. *Land Economics*, 77(2), 219-240. DOI: 10.2307/3147091

Coelho-Junior, M.G.; Valdiones, A.P.; Shimbo, J.Z.; Silgueiro, V.; Rosa, M.; Marques, C.D.L.; Oliveira, M.; Araújo, S.; Azevedo, T. 2022. Unmasking the impunity of illegal deforestation in the Brazilian Amazon: a call for enforcement and accountability. *Environmental Research Letters*, 17(4). DOI: 10.1088/1748-9326/ac5193

Curtis, P.G.; Slay, C.M.; Harris, N.L.; Tyukavina, A.; Hansen, M.C. 2018. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361(6407), 1108–1111. DOI: 10.1126/science.aau3445

de Souza Ferreiro Filho, J. B.; Hanusch, M. 2022. A Macroeconomic Perspective of Structural Deforestation in Brazil's Legal Amazon. *World Bank Policy Research Working Papers No. 10162*. World Bank Group. Available at <http://documents.worldbank.org/curated/en/099259511022263316/IDU0612940060dd49044a30924d0b7995b33ea8c> [accessed on Jun 8, 2023].

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Programa DNITGeo. Available at <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo> [accessed on Jun 8, 2023].

Garcia, A.S; Vilela, V.M.F.N.; Rizzo, R.; West, P.; Gerber, J. S.; Engstrom, P.M.; Ballester,

M.V.R. 2019. Assessing land use/cover dynamics and exploring drivers in the Amazon's arc of deforestation through a hierarchical, multi-scale and multi-temporal classification approach Remote Sensing Applications: Society and Environment, 15, DOI 10.1016/j.rsase.2019.05.002.

Hanusch, M. (Ed.). 2023. A Balancing Act for Brazil's Amazonian States: An Economic Memorandum. The World Bank. Available at <http://hdl.handle.net/10986/39778> [accessed on Jun 8, 2023].

Heilmayr, R., Rausch, L.L., Munger, J.; Gibbs, H.K. 2020. Brazil's Amazon Soy Moratorium reduced deforestation. Nature Food 1, 801–810. DOI: 10.1038/s43016-020-00194-5.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Bases cartográficas contínuas a 250000. Available at <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=downloads> [accessed on Jun 8, 2023].

IMAZON Geo – Geoinformação reunida pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. Available at <https://imazongeo.org.br> [accessed on Jun 8, 2023].

Leite-Filho, A. T.; Soares-Filho, B. S.; Davis, J. L.; Rodrigues, H. O. (2020). Guide book: Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Available at: https://www.csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=guidebook_start. Accessed on May 14, 2023.

Mello, N. G. R. de; Artaxo, P. 2017. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. Revista Do Instituto De Estudos Brasileiros, 66, 108-129. DOI: 10.11606/issn.2316-901x.v0i66p108-129

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2021. IV Inventário de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. Estoques de carbono mapeados para Amazônia. Available at <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial> [accessed on Jun 8, 2023].

MEA - Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well Being: Synthesis. Island Press, Washington DC. Available at <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html> [accessed on Jun 8, 2023].

Pires, T. B. 2014. O uso e aptidão das terras agrícolas no Brasil; uma análise comparativa de 1940 a 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Available at <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-06102014-084628/pt-br.php> [accessed on Jun 8, 2023].

Pontius Jr RG, Boersma W, Castella J-C, Clarke K, de Nijs T, Dietzel C, Duan Z, Fotsing

E, Goldstein N, Kok K, Koomen E, Lippitt CD, McConnell W, MohdSood A, Pijanowski B, Pithadia S, Sweeney S, Trung TN, Veldkamp AT, Verburg PH (2008) Comparing input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann Reg Sci* 42(1):11e47
Porcher, Charly Jason Gaby; Hanusch, Marek. A Model of Amazon Deforestation, Trade and Labor Market Dynamics (English). Policy Research working paper; no. WPS 10163 Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099329011022242501/IDU0c70e2b6904bc5044f00ab57083ff92196da8>

Richards, P.D.; Myers, R. J.; Swinton, S. M.; Walker, R.T. 2012. Exchange rates, soybean supply response, and deforestation in South America. *Global Environmental Change*, 22 (2). DOI 10.1016/j.gloenvcha.2012.01.004.

Richards, P. 2021. A Key Ingredient in Deforestation Slowdowns? A Strong Brazilian Economy. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. DOI: 10.3389/ffgc.2021.613313

Roebeling, P.C.; Hendrix, E.M.T. 2010. Land speculation and interest rate subsidies as a cause of deforestation: The role of cattle ranching in Costa Rica. *Land Use Policy*, 27(2), 489-496. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.07.002

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Observatório do Clima, 2023. Available at <https://seeg.eco.br/> [accessed on Jun 8, 2023].
Rosa, I.M.D., Pereira, H.M., Ferrier, S. et al. 2017. Multiscale scenarios for nature futures. *Nature Ecology & Evolution* 1, 1416–1419. DOI: 10.1038/s41559-017-0273-9

Shukla, J.; Nobre, C.; Sellers, P. 1990. Amazon Deforestation and Climate Change. *Science* 247,1322- 325. DOI:10.1126/science.247.4948.1322

Silva-Junior, C.H.L.; Silva, F.B; Arisi, B.M.; Mataveli, G.; Pessôa, A.C.M.; Carvalho, N.S.; Reis, J.B.C.; Silva Júnior, A.R.; Motta, N.A.C.S.; Moreira e Silva, P.V.; Ribeiro, F.D.; Siqueira-Gay, J.; Alencar, A.; Saatchi, S.; Aragão, L.E.O.C.; Anderson, L.O.; Melo, M. 2023. Brazilian Amazon indigenous territories under deforestation pressure. *Scientific Reports*, 13, 5851. DOI: 10.1038/s41598-023-32746-7

Silvestrini, R.A., Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H. and Assunção, R. (2011), Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, 21: 1573-1590. <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
Soares-Filho, B.; Rodrigues, H.; and Follador, M. 2013. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software*, 43, 80–87. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.01.010.

Terra Brasilis. 2023. Web portal developed by INPE to provide access to spatial data

generated by government environment monitoring programs such as PRODES and DETER. Available at <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/en/home-page/> [accessed on Jun 26, 2023].

Vilela, T.; Harb, A.M.; Botero, R. et al. 2020. A better Amazon road network for people and the environment. PNAS, 117 (13), 7095-7102. DOI: 10.1073/pnas.1910853117.

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. Available at https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CGIAR_SRTM90_V4 [accessed on Jan 8, 2023].

Wang, D.; Hanusch, M.; Gurhy, B.; Kollenda, P. 2023. Could Sustainability-Linked Bonds Incentivize Lower Deforestation in Brazil's Legal Amazon? World Bank Policy Research Working Paper No. 10558. World Bank Group.

World Bank. 2021. Designing Fiscal Instruments for Sustainable Forests

Apêndice

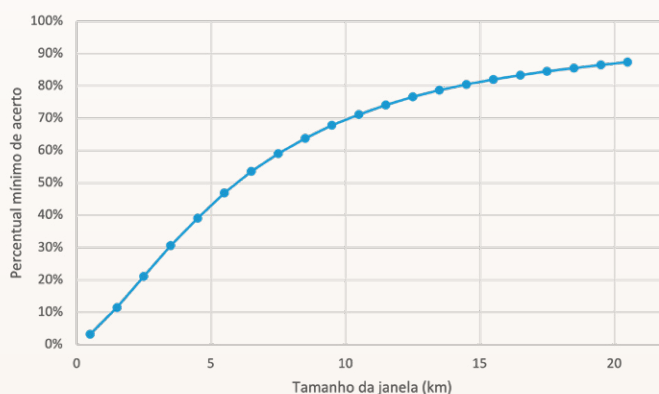
Tabela A1: Componentes principais dos preços globais de commodities

A tabela mostra os quatro primeiros componentes principais dos preços globais de commodities em reais entre 1996 e 2020 (frequência anual). Os dados foram obtidos do FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis. Louis. Observe que o modelo de seleção de variáveis LASSO selecionou o segundo e o quarto componentes principais para a análise. A figura mostra os resultados da validação do algoritmo de alocação espacial, comparando

Componente principal	1	2	3	4
Carne bovina	0.3522	0.4019	-0.0203	0.5664
Milho	0.3641	-0.0979	-0.2659	-0.0701
Troncos duros	0.3586	0.3387	-0.1922	-0.0990
Café (Árábica)	0.3536	0.1899	0.4833	0.3263
Soja	0.3606	-0.0139	-0.4148	-0.1546
Açúcar	0.3450	0.0784	0.6011	-0.6206
Óleo de soja	0.3619	-0.1311	-0.3096	-0.2356
Minério de ferro	0.3323	-0.8091	0.1706	0.3057
Variância explicada	90.06%	93.46%	96.13%	97.97%

o desmatamento observado e o desmatamento simulado na Amazônia Legal do Brasil usando dados do PRODES. A validação calcula a similaridade espacial, seguindo o método de similaridade Fuzzy (Soares-Filho et al., 2013).

Figura A2: Validação da simulação espacial com diferentes tamanhos de janela.



Modelo de desmatamento espaço-temporal com vazamento

O modelo descrito na equação (2) está no nível nacional ou regional, que visa modelar o efeito da dinâmica macroeconômica sobre o desmatamento em um nível agregado. Nesta seção, descrevemos como (2) poderia ser reformulado para capturar o efeito em entidades subnacionais juntamente com os efeitos de transbordamento. Essa estrutura serve de base para discussões e pesquisas futuras.

Modelo de Painel Dinâmico

Para simplificar a notação, vamos estender (2) e reescrevê-la em notação vetorial, em que y_t representa um vetor de valores de desmatamento com valor típico y_{it} , com $i=1, \dots, N$ denotando a entidade.⁶ Além disso, sem perda de generalidade, vamos considerar apenas uma defasagem, que é $p=1$, juntamente com apenas um efeito de evento de política.

$$y_{it} = \phi y_{it-1} + G_t^T \delta_i + L_{it}^T \gamma_i + \pi_{it} + e_{it} \quad (3)$$

Aqui, G_t é um vetor de fatores globais, como a taxa de câmbio real efetiva ou os preços de commodities, que podem ter efeitos específicos da entidade, δ_i . Por outro lado, L_{it} é um vetor de variáveis locais específicas da entidade, como a densidade populacional ou a parcela de áreas protegidas, com efeitos específicos da entidade γ_i . Também presumimos que as políticas, que podem ser relevantes para mais de uma entidade e período, terão

⁶ As entidades podem ser unidades administrativas, como estados ou municípios, ou unidades geográficas, como células de 1 km x 1 km em uma grade. A matriz de distância espacial W seria ajustada de acordo.

efeitos específicos de tempo e entidade, π_{it} . O modelo (3) expressa a ideia de que o desmatamento em uma entidade específica é impulsionado por fatores globais (G_t) e locais (L_{it}), e que os mesmos fatores podem ter efeitos heterogêneos (δ_i, γ).

Podemos expressar isso de forma mais compacta como um modelo de série temporal com valor vetorial.

$$y_t = \phi y_{t-1} + G_t^T \delta + L_t^T \gamma + \pi_t + e_t \quad (4)$$

Para simplificar ainda mais a notação, definimos um componente de variável exógena que contém fatores globais e locais, ou seja, $X_t^T \beta = G_t^T \delta + L_t^T \gamma$. Consequentemente, o modelo (4) passa a ser

$$y_t = \phi y_{t-1} + X_t^T \beta + \pi_t + e_t \quad (5)$$

Modelagem espacial para vazamento

O pressuposto subjacente nos modelos (3)-(5) é que as entidades i estão isoladas umas das outras. No entanto, isso está longe da realidade, em que as regiões vizinhas sofrem efeitos de transbordamento ou externalidades em geral. Ou seja, o desmatamento na região i pode ser impulsionado não apenas por fatores globais e locais, mas também por dependências espaciais com uma região vizinha j . Denotamos essa distância entre i e j como w_{ij} , que constitui $N \times N$ matriz de dependência espacial W .

$$\begin{aligned} y_t &= \rho W y_t + \phi y_{t-1} + X_t^T \beta + W X_t^T \beta^* + \pi_t + W \pi_t^* + u_t \\ u_t &= \lambda W u_t + e_t \quad e_t \sim N(0, \Sigma) \end{aligned} \quad (6)$$

A matriz W entra no modelo (6) por meio de vários canais. Nem todos os canais são necessários para estimar o efeito de interesse. No entanto, descrevemos todos os componentes por uma questão de generalidade.

- $\rho W y_t$: Transbordamentos contemporâneos devido ao desmatamento em regiões vizinhas.
- $W X_t^T \beta^*$: Repercussões contemporâneas (ou defasadas) devido a fatores globais ou locais nas regiões vizinhas.
- $W \pi_t^*$: Repercussões contemporâneas (ou defasadas) devido a políticas em regiões vizinhas.
- $\lambda W u_t$: Dependência espacial na estrutura de erro.

A inclusão de W não é apenas para modelar os canais de interesse, mas também para controlar as variáveis omitidas e os problemas de endogeneidade decorrentes da proximidade espacial. Testes de diagnóstico espacial, como os testes I de Moran ou Multiplicador de Lagrange, devem ser realizados para identificar quais componentes

espaciais são mais relevantes. Observe que o componente autorregressivo espacial $\rho W y_t$ torna o modelo não linear e exige métodos de estimativa de máxima verossimilhança. Além disso, embora o modelo tenha sido escrito com dados anuais em mente, é possível estimá-lo em frequências mais altas. Nesses casos, seria interessante permitir que os parâmetros de dependência espacial ρ, β^*, λ variassem no tempo, uma vez que a dinâmica do desmatamento tem um componente sazonal. Existem na literatura modelos de espaço de estado e métodos de estimativa apropriados.

Vale a pena mencionar que a variável dependente pode ser a própria taxa de desmatamento ou uma probabilidade de desmatamento. Isso pode ser feito com o uso de uma transformação probit ou logit, o que produziria resultados mais próximos da noção de “floresta em risco”. Por fim, a matriz de distância W geralmente se refere a distâncias geográficas. Entretanto, o vazamento de desmatamento nem sempre é uma função da distância. Evidências anedóticas apontam para transbordamentos para regiões comparáveis ou semelhantes, que podem servir como substitutos sempre que uma região-alvo é colocada sob proteção. Nesses casos, a matriz W capturaria as semelhanças em vez das distâncias.