

Modelos para a previsão de alertas de desmatamento na Amazônia Legal

Iago Gomes Gonçalves¹  | Marcelo Dias Paes Ferreira² 

¹ Doutorando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: iago.goncalves@ufv.br

² Professor Adjunto no Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: marcelo.ferreira@ufv.br

RESUMO

Este estudo buscou selecionar um modelo para a previsão dos alertas de desmatamento na Amazônia legal a partir dos dados gerados pelo monitoramento via satélite do DETER-B, entre agosto de 2015 e abril de 2022. A série temporal de alertas de desmatamento foi analisada e, em seguida, realizaram-se previsões dos alertas de desmatamento, valendo-se dos modelos de previsão da classe ARIMA sazonais. Foi identificada a presença de quebra estrutural em maio de 2019 e sazonalidade estocástica. Foram feitas previsões dinâmicas para seis períodos a frente do último valor da amostra, para comparar com os valores de fora da amostra e verificar a qualidade das previsões. As especificações foram precisas em prever os alertas seis meses à frente, indicando que os formuladores de políticas públicas podem criar expectativas razoáveis quanto aos alertas, principalmente, ao permitir a adoção de medidas de cunho preventivo ao desmatamento.

PALAVRAS-CHAVE

Arima, Quebras estruturais, Sazonalidade

Models for predicting deforestation alerts in the Legal Amazon

ABSTRACT

This study sought to select a forecast model for deforestation alerts in the Legal Amazon from data generated by satellite monitoring of DETER-B between August 2015 and December 2021. The time series of deforestation alerts was analyzed and then, forecasts of deforestation alerts were made, using seasonal ARIMA class forecasting models. The presence of structural break in May 2019 and stochastic seasonality was identified. Dynamic forecasts were made for six periods forward of the last value of the sample, to compare with the values outside the sample and verify the quality of the forecasts. The specifications were accurate in predicting the alerts six months forward, indicating that public policymakers can create reasonable expectations about the alerts, mainly by allowing the adoption of preventive measures for deforestation.

KEYWORDS

Arima, Structural breaks, Seasonality

CLASSIFICAÇÃO JEL

Q23, Q28, Q57

1. Introdução

A política ambiental, bem como os resultados dessas, tem sido um forte condicionante da competitividade da agricultura. No âmbito brasileiro, sobretudo na região Amazônica, as políticas ambientais são fatores de relevância estratégica e transversal a diversos setores e áreas governamentais. Desse modo, preservar o bioma nativo torna-se uma condição crucial para garantir a preservação dos elementos essenciais ao bem-estar humano, bem como para sustentar as atividades agropecuárias e energéticas em outras áreas do país (Gandour, 2021).

O Brasil foi o país que mais perdeu área de floresta na última década (2010-2020), seguido por República Democrática do Congo, Indonésia e Angola (FAO, 2020). A área de floresta perdida pelo Brasil a cada ano na última década correspondeu a 1,5 milhão de hectares. Apesar do resultado negativo, o volume da área perdida foi reduzido. Em termos comparativos, entre 1990 e 2000 a taxa anual de perda líquida de floresta foi de 3,78 milhão de hectares, enquanto entre 2000 e 2010 a taxa anual de perda líquida de floresta foi de 3,95 milhão de hectares, antes de reduzir para 1,5 milhão de hectares em 2010-2020.

O desmatamento na Amazônia é resultado da continuidade dos padrões de expansão da fronteira agrícola no Brasil, incluindo processos como ocupação de terras sem direitos legais, extração de madeira, pecuária e desenvolvimento de práticas agrícolas modernas (Reydon et al., 2020). Nesse sentido, a prática de desmatamento na Amazônia Legal se relaciona também com a grande quantidade de terras vagas existentes, o que torna a prática de desmatamento uma ação financeiramente atrativa e, ao mesmo tempo, especulativa, tendo em vista a combinação de fatores geradores de incerteza, como regime de posse menos rigoroso e política de proteção pública reduzida (Sparovek et al., 2019).

Ferreira e Coelho (2015) associam o processo de desmatamento na Amazônia Legal a fatores de mercado, como variações nos preços de *commodities* agrícolas, como também políticas governamentais que combatem o desmatamento. Apesar da terra ser um fator de produção essencial para a agropecuária, avanços tecnológicos podem fazer com que uma estagnação da fronteira agrícola tenha um impacto quase nulo na economia brasileira (Ferreira Filho et al., 2015). Isso ocorre porque o avanço na fronteira agrícola no Brasil, sobretudo no bioma Amazônico, se dá por meio de uma lógica de acumulação de ativos e especulação do uso da terra Bowman et al. (2012) e o fator terra é usado de maneira ineficiente na Amazônia Legal (Ferreira e Féres, 2020).

O avanço da agropecuária no Mato Grosso e da pecuária no Pará na década de 1990 até meados dos anos 2000 representou uma ameaça ao desmatamento da Floresta Amazônica (Vieira Filho, 2016). Nesse período, observou-se que a taxa anual de desmatamento da Amazônia Legal aumentou consideravelmente, sobretudo entre 1998 e 2004, ao atingir o segundo maior valor da série histórica, com cerca de 27.772 km^2 de área desmatada em 2004. Nesse mesmo período houve o aumento da produção

de grãos pelo Brasil, Contini et al. (2006), acompanhado pelo crescimento significativo da procura internacional por soja e carne bovina (Brandão et al., 2006).

Nessa perspectiva, ao passo que a pressão da sociedade junto ao poder público aumentava para que o Brasil controlasse suas altas taxas de perda florestal, e diante de um aumento significativo nas taxas de desmatamento na região da Amazônia Legal, o Brasil criou o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm). Concebido em 2004, o PPCDAm representou um esforço coordenado pelo Governo Federal com caráter interministerial cujo objetivo era reduzir o desmatamento de maneira contínua e promover um conjunto de condições que possibilitassem a transição para um modelo de desenvolvimento sustentável na Amazônia Legal (BRASIL, 2004).

No mesmo ano, foi criado o Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo Real (DETER) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com objetivo de fornecer suporte à fiscalização e controle de desmatamento na Amazônia (INPE, 2019). O DETER se destacou por oferecer um levantamento em tempo quase real de evidências de alterações na cobertura florestal superiores a 25 hectares (Diniz et al., 2015). Malingreau et al. (2012) argumentam que, apesar dos esforços das autoridades para controlar o desmatamento, a reversão de tendência era esperada, à medida que novas políticas ambientais foram propostas para atender aspirações econômicas na região amazônica, em um período de nível de desmatamento relativamente baixo. Ademais, Fearnside (2017) sugere que a promulgação da Lei 12.651/2012 enfraqueceu a nova versão do Código Florestal, ao flexibilizar regras referentes ao cumprimento das normas de conservação da vegetação.

À vista disso, entre 2007 e 2014 houve uma redução de 72% dos recursos direcionados ao PPCDAm Castelo et al. (2018), ao mesmo tempo em que emergia um cenário de crise econômica e deterioração do compromisso com a regulamentação ambiental brasileira, corroborando a tendência de aumento das taxas de desmatamento da Amazônia Legal após 2012 (Burgess et al., 2019). No entanto, segundo Assunção et al. (2023), o monitoramento da vegetação no território da Amazônia Legal através do DETER possibilitou a aplicação da lei ambiental de modo eficaz, ao passo que alterações na cobertura florestal maiores que 25 hectares passaram a ser detectadas mais rápido. Entretanto, Gandour (2021) argumenta que os instrumentos utilizados no combate ao desmatamento precisam ser constantemente aprimorados, tendo em vista que os agentes desmatadores adaptam suas práticas ilegais, à medida que novas formas de monitoramento são adotadas.

Nos últimos anos, tem-se observado um comportamento crescente do desmatamento em grande escala, com polígonos maiores que 100 hectares INPE (2022), além do estímulo a práticas de grilagem, mineração clandestina e exploração madeireira predatória (Brito et al., 2019). Tais práticas se configuram como uma resposta dos agentes envolvidos no desmatamento às estratégias políticas ambientais passivas adotadas pelo Brasil nos últimos anos, Trancoso (2021), alinhado, especialmente, à ex-

pectativa de impunidade da parte dos desmatadores (Rajão et al., 2021; Valdes et al., 2020). Sob essa ótica, uma mera sinalização de convivência com práticas contrárias às políticas ambientais vigentes, pode desencadear uma série de atos ilegais. Portanto, o compromisso com a legislação é fundamental para que haja redução do desmatamento na Amazônia (Gandour, 2021).

Em resposta às mudanças nos padrões de desmatamento, o Centro Regional da Amazônia do INPE desenvolveu o projeto DETER-B (INPE, 2019). O DETER-B permite a realização de mapeamento dos alertas de desmatamento e demais coberturas florestais, em tempo quase real, com área mínima próxima de 1 hectare (Diniz et al., 2015). O objetivo principal do DETER-B é aumentar a capacidade de detecção de desmatamentos em estágios iniciais de degradação ambiental, facilitando a priorização das áreas com indícios de desmatamento por parte das entidades fiscalizadoras (INPE, 2019).

Ainda que o uso estratégico de tecnologias de monitoramento forneça instrumentos essenciais de combate ao desmatamento, é primordial que o Brasil assegure respaldo institucional para que o Estado tenha capacidade de resposta efetiva a práticas ilegais de desmatamento (Finer et al., 2018; Gandour, 2021). Nessa perspectiva, as ameaças crescentes ao meio ambiente nos últimos anos no Brasil, sobretudo a ascensão do número de alertas de desmatamento emitidos, são associadas ao enfraquecimento dos órgãos ambientais e do código florestal, à anistia ao desmatamento e à redução das áreas protegidas (Valdes et al., 2020; Vale et al., 2021).

Acontecimentos recentes reforçam a trajetória de precarização da fiscalização ambiental de órgãos federais, seja pela redução de repasses financeiros seja por alterações e flexibilizações ambientais (Rajão et al., 2021). Dito de outro modo, a negligência com as políticas ambientais no Brasil vem potencializando o desmatamento na Amazônia (Coelho-Junior et al., 2022). Levando em conta a fragilidade institucional do país nos últimos anos, a pandemia de COVID-19 também se concebeu como uma oportunidade de enfraquecimento da proteção ambiental, em que 49% das mudanças na legislação ambiental ocorreram nos primeiros sete meses de pandemia, de março a agosto de 2020, somadas a uma redução de cerca de 70% das multas ambientais (Vale et al., 2021).

Os avisos de desmatamento georreferenciados emitidos pelo DETER-B indicam as regiões que demandam atenção imediata, contribuindo para a orientação na imposição de penalidades e multas relacionadas ao meio ambiente. A contribuição deste trabalho em relação ao DETER-B reside na capacidade de não apenas monitorar eventos passados, mas também de antecipar o que está por vir, fornecendo informações para a formulação de políticas públicas. No contexto desta pesquisa, o exercício busca aprimorar a capacidade de prever cenários futuros, visando a uma contribuição efetiva para a tomada de decisões e à implementação eficaz de políticas.

Nesse sentido, é crucial que as autoridades brasileiras demonstrem uma capaci-

dade de resposta eficaz para verdadeiramente conter a prática ilegal de desmatamento. Assim, a vigilância da cobertura florestal com base no georreferenciamento assume especial importância no contexto brasileiro, representando uma oportunidade singular para alcançar padrões satisfatórios da atuação do Estado na aplicação de medidas punitivas ambientais.

Dessa maneira, nota-se a importância de incluir modelos de previsão no planejamento de políticas públicas de combate ao desmatamento, sobretudo vinculadas a ações preventivas, levando em conta os dados dos alertas emitidos pelo sistema DETER-B. Além do mais, que tenham funcionalidade em conjunto com órgãos fiscalizadores, para frear o número de alertas de desmatamento emitidos e, conseqüentemente, os índices oficiais de desmatamento, ao mesmo tempo em que o número de sanções aplicadas seja coerente com o número de alertas emitidos quase em tempo real. Somado ao fato que, ao ocorrer adaptação dos agentes desmatadores à política ambiental, tais políticas podem perder efetividade. Por isso, uma ferramenta que auxilie na previsão de ocorrência do desmatamento pode ser de suma importância para as autoridades.

Diante da emergência de o Brasil retomar políticas efetivas no combate ao desmatamento, especialmente na Amazônia Legal, valendo-se dos dados referentes aos monitoramentos via satélite dos alertas de desmatamento na região da Amazônia Legal, coletados pelo DETER-B e disponibilizados pelo portal TerraBrasilis¹, o objetivo deste estudo consiste em analisar os dados agregados mensais da área total sob alertas de desmatamento na região da Amazônia Legal de agosto de 2015 a abril de 2022.

Contudo, não há abordagens univariadas de séries temporais, especialmente modelos da classe ARIMA, que analisam os alertas de desmatamento. Nesse sentido, embora a compreensão do desmatamento demande uma análise abrangente que considere a interconexão de diversos elementos, dentro do escopo do uso estratégico dos sistemas de monitoramento no combate ao desmatamento, trabalhar com modelos de previsão dos alertas de desmatamento apresenta conotação estratégica no que tange à fiscalização de áreas desmatadas e à aplicação de sanções aos infratores. Desse modo, o presente estudo busca preencher a lacuna na análise univariada de séries temporais ambientais. Ademais, entende-se que a aplicação de modelos ARIMA univariados é limitada em relação à inferência causal, contudo os resultados permitem que sejam extraídos esclarecimentos sobre a temática, integrando os alertas em outras análises estatísticas que avaliam o desmatamento, a exemplo de (Assunção et al., 2023).

As técnicas de previsão de séries de tempo auxiliam a tomada de decisão em atividades que requerem planejamento, pois o desenvolvimento desses modelos permite a interpretação, previsão e teste das hipóteses referentes aos dados utilizados (Lima,

¹O portal TerraBrasilis é uma plataforma de dados geográficos desenvolvida pelo INPE para consulta, análise e compartilhamento de dados gerados pelos projetos de monitoramento da vegetação nativa como o PRODES e o DETER.

2015). Para isso, os dados serão ajustados a modelos da classe ARIMA a fim de especificar qual o modelo gerador da série de avisos de desmatamento e, posteriormente, de realizar previsões dos valores das áreas sob alerta de desmatamento da Amazônia Legal seis períodos à frente para dados de fora da amostra, de maio a outubro de 2022, com o intuito de mensurar a qualidade da previsão e, dessa maneira, verificar a aplicabilidade de modelos de previsão em políticas preventivas de combate ao desmatamento.

2. Revisão de Literatura

O fenômeno do desmatamento é inerentemente complexo, caracterizado por uma multiplicidade de determinantes que envolvem variáveis socioeconômicas, ambientais, demográficas e políticas (Arraes et al., 2012). Além disso, a Amazônia é objeto de estudo em diferentes âmbitos e vem enfrentando um aumento nas taxas de desmatamento nos últimos anos, agravadas especialmente desde 2019 (Amigo, 2020). Nesse sentido, as projeções de um cenário desfavorável com aumento do desmatamento são reforçadas a partir do aumento do número de alertas de desmatamento emitidos em 2020, em torno de 34% maior que a média dos anos anteriores (INPE, 2020). Essa revisão é dividida em duas partes: a primeira evidencia a importância de utilizar os alertas de desmatamento em análises empíricas e a segunda busca conectar a literatura de previsão de séries temporais com o meio ambiente, especificamente com desmatamento e alertas de desmatamento.

Em primeiro lugar, o sensoriamento remoto através de satélites é uma maneira eficaz de monitorar diversas variáveis ambientais (FAO, 2020). No caso brasileiro, o monitoramento remoto via satélite e a fiscalização tem apresentado resultados efetivos contra o desmatamento (Assunção et al., 2023). A necessidade de informações em tempo quase real, sobretudo para antecipar a ação ilegal dos desmatadores, torna essa ferramenta de suma importância, como abordado por Finer et al. (2018). Os autores afirmam que os avanços tecnológicos em termos de monitoramento desempenham papel fundamental na realização de metas locais, nacionais e internacionais e que as evidências de monitoramento no Brasil exibem resultados positivos, mas que há necessidade de promover o fortalecimento institucional e envolvimento da sociedade civil para progredir ainda mais nos resultados.

Moffette et al. (2021) analisam o impacto da utilização de alertas de desmatamento em 22 países tropicais. Os resultados mostram que os alertas de desmatamento diminuíram em 18% a probabilidade de desmatamento na África em relação aos níveis médios de 2011-2016, no entanto não foram encontradas evidências de redução de desmatamento em outros continentes. No caso brasileiro, Mataveli et al. (2022) destacam pontos de desmatamento que foram descobertos às margens da BR-319 após a publicação de editais de pavimentação da rodovia. Os autores apontam que três meses após a divulgação dos editais, as queimadas e os alertas de desmatamento aumentaram significativamente, mas não houve estudo de impacto ambiental, o que

reforça a possibilidade de haver um aumento nas áreas sob alerta de desmatamento, à medida que a legislação e a fiscalização ambiental possuem falhas e não possuem contingente capaz de atender toda a extensão da rodovia. Em consonância, Rajão et al. (2021) afirmam que a redução do quadro de pessoal dos órgãos fiscalizadores impactou diretamente a realização de atividades fiscalizatórias de maneira efetiva.

Gandour (2021) argumenta que os resultados das avaliações empíricas não devem ser analisados e interpretados sobre ações específicas, mas sim como evidências sob um arranjo de instrumentos de política pública. Sendo assim, o conjunto de esforços de monitoramento, fiscalização e sanções foi eficaz no combate ao desmatamento a partir de 2004 até meados de 2012 (Arima et al., 2014; Mello e Artaxo, 2017). Nesse período, a área desmatada total na Amazônia Legal apresentou quedas sucessivas, reduzindo de 27.772 km^2 em 2004 para 4.571 km^2 em 2012, mínima histórica registrada pela série do DETER (INPE, 2022).

Observa-se a mudança nos padrões de desmatamento ao longo do tempo, como a redução do tamanho médio das áreas de corte raso Rosa et al. (2012), e a redução em 46% de clareiras florestais superiores a 50 hectares e o aumento em 34% de clareiras inferiores a 1 hectare entre 2001 e 2014 (Kalamandeen et al., 2018). Ainda, Montibeller et al. (2020) atentam para a redução do número de grandes manchas (> 6,25 ha) de perda florestal entre 2001 e 2015, porém, nos dois anos seguintes, o número de manchas aumentou significativamente. Desse modo, nota-se a adoção crescente de práticas de desmatamento em pequena escala na Amazônia, ou seja, os desmatadores se adaptaram aos mecanismos de detecção de desmatamento pelo sistema de monitoramento via satélite.

Embora cerca de 1,3% dos alertas de desmatamento na Amazônia tenham correspondido a autos de infração pelo IBAMA entre 2019 e 2020 Coelho-Junior et al. (2022), o sistema de monitoramento que emite alertas de desmatamento na região da Amazônia Legal (DETER-B) é primordial para que a engrenagem do combate ao desmatamento possa funcionar de maneira adequada, à medida que seus resultados podem ser interpretados como um termômetro da evolução do desmatamento, mesmo que isso não possa ser analisado sob a perspectiva da taxa real de desmatamento.

A respeito dos modelos de previsão, Kaur et al. (2023) denotam que ARIMA e meio ambiente estão altamente correlacionados, pois a previsão é necessária em todas as nuances do meio ambiente, como poluição atmosférica, sonora, combustíveis fósseis, dados pluviométricos e águas subterrâneas. A importância dos modelos de previsão univariados reside na sua capacidade de oferecer previsões precisas e oportunas, independentemente das limitações associadas à observação via satélite. Por sua vez, Wang et al. (2009) ressaltam a necessidade de compreender a natureza dos dados históricos para selecionar a técnica mais apropriada, destacando a importância do conhecimento prévio sobre os dados.

A utilização de modelos de previsão univariados para alertas de desmatamento na

Amazônia Legal é relevante e oferece uma abordagem complementar essencial para prever e compreender as dinâmicas do desmatamento na região amazônica, mesmo diante da presença de nuvens que podem obstruir o monitoramento por satélite. Embora o sistema de monitoramento remoto, como o utilizado pelo DETER-B, represente um avanço significativo, a limitação técnica relacionada à presença de nuvens é inerente aos sistemas que dependem de imagens ópticas. Conforme destacado por Assunção et al. (2023), as imagens captam apenas as nuvens, não permitindo visualizar o que está abaixo delas. Essa limitação, que afeta a capacidade de detectar clareiras na presença de nuvens, restringe a eficácia do monitoramento via satélite.

Effrosynidis et al. (2023) avaliam 68 variáveis ambientais com frequências diária e mensal usando séries temporais clássicas e métodos de regressão. Os autores concluem que os métodos convencionais de séries temporais podem ser opções menos precisos em tarefas de extrapolação, de modo que sua aplicação deve ser restrita a métodos como ARIMA, que demonstra uma relativa robustez diante de alterações não esperadas nos padrões das séries, sendo capazes de capturar de forma simultânea componentes relevantes nas séries temporais, como sazonalidade e tendência. Dessa forma, além de contribuir para a ampliação da literatura do tema, a aplicação de modelos ARIMA contribui para a previsão dos alertas de desmatamento, apesar de haver restrições impostas pela presença de nuvens nas imagens georreferenciadas.

Mayfield et al. (2017) denotam que os modelos lineares generalizados e os modelos lineares mistos generalizados são um conjunto de técnicas estatísticas comumente aplicadas na previsão de desmatamento. Por essa razão, os autores avaliam o conjunto de dados georreferenciados para previsão de desmatamento no México e em Madagascar, comparando modelos generalizados com modelos de aprendizagem de máquina. O objetivo dos autores consiste em avaliar se o aprendizado de máquina é capaz de melhorar os métodos mais comumente usados da estatística clássica, de modo a oferecer aos demais pesquisadores orientação sobre o desempenho comparativo dos métodos analíticos utilizados na previsão do desmatamento.

Por sua vez, o presente estudo busca analisar os modelos de séries temporais ARIMA, fornecendo mais uma alternativa de análise para a literatura ambiental de séries temporais. As técnicas de suavização exponencial e os modelos da classe ARIMA são os métodos preditivos de séries temporais mais utilizados, sendo considerados os mais intuitivos e de compreensão simples. Contudo, o modelo ARIMA é popularmente mais aceito, devido à precisão matemática e à confiabilidade obtida a partir da metodologia Box-Jenkins, sobretudo quando se tratam de séries temporais puramente econômicas (Kaur et al., 2023).

Nessa perspectiva, Costa et al. (2021) analisam dados históricos de desmatamento na região da Amazônia Legal brasileira de 1988 a 2018 e realizam previsões de desmatamento para os próximos sete anos (2019 a 2023) utilizando a metodologia Box-Jenkins. Foram levados em conta dois cenários, o primeiro sem intervenção e o segundo com intervenção na série. Os resultados sugerem que, sem intervenção signi-

ficativa, as taxas de desmatamento permaneçam dentro de uma determinada faixa, enquanto com a intervenção, pode haver um aumento significativo nas taxas de desmatamento. Os autores reforçam a necessidade de fortalecimento da estrutura de governança ambiental para a região da Amazônia Legal brasileira, incluindo a melhoria dos sistemas de detecção e monitoramento e a realização de operações para combater o desmatamento ilegal.

A pesquisa contribui para a compreensão do comportamento do desmatamento na região e destaca a necessidade de medidas preventivas para reduzir o desmatamento e minimizar os danos ambientais. Ademais, o último ponto dialoga diretamente com o presente estudo, à medida que os autores reforçam a importância do monitoramento remoto, que diz respeito aos alertas de desmatamento do DETER-B. Nesse contexto, apesar de as projeções dos alertas de desmatamento não serem totalmente precisas em tempo real devido à presença de potenciais fatores exógenos, como a presença de nuvens, pelo fato de os alertas serem agregados mensalmente na base de dados, as projeções simulam a variação estatisticamente provável do desmatamento na área de estudo.

Como a área devidamente desmatada e a área referente aos alertas de desmatamento na Amazônia Legal são geralmente associadas, tais modelos oferecem uma perspectiva temporal mais detalhada, mas também funcionam como um termômetro do nível de desmatamento. Ao explorar padrões sazonais nos dados históricos, eles proporcionam percepções pertinentes sobre a dinâmica do desmatamento, permitindo a detecção de variações e tendências mesmo em cenários desafiadores de monitoramento.

A literatura tradicional que investiga o desmatamento e seus determinantes tem incluído, em análises mais recentes, os alertas de desmatamento, pois entende-se que são um mecanismo que permitem o melhor direcionamento da fiscalização pelas autoridades e, conseqüentemente, aplicação de sanções aos infratores. Entretanto, as análises se concentram, em grande medida, na inclusão dos alertas como variável de controle e não como uma variável de interesse ou para compreender seus determinantes. Assunção et al. (2023) são os pioneiros na análise empírica do monitoramento ambiental e da aplicação da lei, ao abordar a relação entre desmatamento ilegal e aplicação da lei na região amazônica. Para avaliar as implicações da fiscalização sobre as taxas de desmatamento, os autores utilizam a abordagem de variáveis instrumentais para avaliar essa relação causal e estabelecem a cobertura de nuvens como instrumento para a aplicação da lei ambiental.

Contudo, embora existam diversos esforços voltados para aplicação de modelos preditivos para o meio ambiente, esse tipo de evidência não foi encontrado utilizando os dados do monitoramento via satélite do DETER-B para os alertas de desmatamento na Amazônia Legal. Nesse sentido, uma contribuição do presente estudo para a literatura do tema se refere à possibilidade de as estimativas serem utilizadas na elaboração de políticas ambientais que minimizem o desmatamento, principalmente

com características preventivas em contraste com políticas reativas, tendo em vista que os alertas de desmatamento indicam áreas que necessitam de atenção das autoridades fiscalizadoras, haja vista o desmatamento eminente. Por isso, os resultados obtidos podem ser utilizados como uma medida antecipada que auxilie a elaboração de políticas preventivas de combate ao desmatamento na Amazônia Legal, ao fornecer estimativas do número de alertas de desmatamento n períodos à frente.

Ademais, essa abordagem, centrada em modelos univariados, proporciona uma análise mais específica do comportamento temporal dos alertas de desmatamento. Ao empregar modelos ARIMA, é possível capturar padrões, sazonalidades e tendências subjacentes nos dados, permitindo uma previsão mais eficiente. Ao inserir a série temporal dos alertas de desmatamento em modelos ARIMA, amplia-se o escopo da literatura ambiental ao incorporar uma metodologia específica de previsão em uma área que tradicionalmente enfatiza análises mais abrangentes. Isso enriquece o campo de estudo, alinhando-se com a necessidade de estratégias preventivas e proativas no enfrentamento do desmatamento.

3. Metodologia

3.1 Modelo Empírico

A princípio, para fins deste estudo, a metodologia de Box e Jenkins, ou Arima, é adotada, considerando sua aplicabilidade em modelagens de séries temporais univariadas (Box e Jenkins, 1976). Assim, busca-se encontrar o modelo que melhor se ajusta aos dados e que gere as melhores previsões, baseando-se nas observações presentes e passadas (Enders, 2015). Os procedimentos da metodologia Box e Jenkins são divididos em quatro etapas: identificação, estimação, verificação e previsão (Morettin e Tloi, 2006; Bueno, 2012).

A finalidade da etapa de identificação é verificar qual modelo melhor descreve o comportamento da série (Bueno, 2012). A visualização do gráfico da série, apesar de ser um procedimento informal, oferece sugestões sobre a estacionariedade da série, se possui ou não tendência, sazonalidade e se pode haver quebras estruturais nos dados (Enders, 2015). Nesse aspecto, é preciso verificar a necessidade de transformação da série, a fim de tornar a série adequada para a análise, porém nesse estudo trabalha-se com a série sem transformações e, em terceiro lugar, determinar a ordem de integração da série.

O primeiro passo ao se trabalhar com séries de tempo consiste em determinar se a série possui ou não raiz unitária. Para isso, são aplicados os testes Augmented Dickey-Fuller (ADF) e Philips-Perron (PP), considerando uma equação com constante e sem tendência². A hipótese nula dos testes é de que a série possui raiz unitária, ou seja, que a série é não estacionária em nível. Os critérios de informação de Akaike

²Ver Bueno (2012) para mais detalhes sobre os testes aplicados.

(AIC), Schwarz (SC) e Hannan-Quinn (HQ)³ são utilizados para determinar o número de defasagens ideal. A escolha desse número leva em conta o número de defasagens necessário para eliminar a autocorrelação dos resíduos.

De maneira complementar, será realizado o teste de raiz unitária Zivot-Andrews, que permite identificar uma quebra estrutural na série, que pode ocorrer no intercepto, na tendência ou em ambos. Quando a série contém quebras estruturais, as estatísticas do teste de Dickey-Fuller são tendenciosas para a não rejeição de uma raiz unitária (Enders, 2015).

Ademais, é preciso testar a existência de raiz unitária sazonal antes de modelar a série. Segundo Lima (2015), a existência de raiz unitária sazonal é resultado da tendência estocástica nos picos sazonais (sazonalidade estocástica), indicando que a série é sazonalmente não estacionária. Caso se verifique a presença de raiz unitária sazonal, a série a ser modelada precisa ser sazonalmente diferenciada. Desse modo, a fim de verificar a presença ou não de sazonalidade estocástica, ou seja, a mudança no padrão sazonal da série ao longo do período analisado, aplicar-se-á o Teste de HEGY⁴. A realização do teste de HEGY consiste em estimar a seguinte equação por Mínimos Quadrados Ordinários:

$$\begin{aligned} \varphi^*(B)y_{8,t} = & \pi_1 y_{1,t-1} + \pi_2 y_{2,t-1} + \pi_3 y_{3,t-1} + \pi_4 y_{3,t-2} + \pi_5 y_{4,t-1} + \pi_6 y_{4,t-2} + \pi_7 y_{5,t-1} \\ & + \pi_8 y_{2,t-2} + \pi_9 y_{6,t-1} + \pi_{10} y_{6,t-2} + \pi_{11} y_{7,t-1} + \pi_{12} y_{7,t-2} + \mu_t + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (1)$$

Em que $y_{8,t} = (1 - B^{12})s_t$, e $\varphi^*(B)$ é uma função polinomial de B, na qual a suposição proposta no estudo se aplica⁵.

O teste de HEGY permite testar a hipótese da presença de raiz unitária regular (não sazonal) ao analisar o coeficiente π_1 , enquanto os demais coeficientes se referem à raiz unitária sazonal. Desse modo, se $\pi_1 = 0$, a presença de raiz unitária não sazonal não pode ser rejeitada. Se $\pi_2 = 0$, a presença de uma raiz unitária sazonal não pode ser rejeitada. Ademais, se $\pi_3 = \pi_4 = 0$, a presença de uma raiz unitária sazonal também não pode ser rejeitada. Se $\pi_i = \pi_{i+1} = 0$, então a presença de uma raiz unitária sazonal não pode ser rejeitada para $i = 5, 7, 9$ e 11 . Essa hipótese também pode ser testada através de um teste F conjunto, que tem distribuição não padronizada (Ronderos, 2015). Em outras palavras, se pelo menos um dos coeficientes for igual a zero, ou seja, $\pi_i = 0$, com $i = 2, 3, \dots, 12$, haverá raiz unitária sazonal na série, indicando a presença de sazonalidade estocástica (Lütkepohl e Krätzig, 2004).

Sob o aspecto da modelagem de uma série, conhecer as características da série estudada previamente é importante. Dessa forma, séries de tempo com periodicidade

³Ver Enders (2015).

⁴Introduzido por Hylleberg et al. (1990) e, posteriormente, por Ghysels et al. (1994). Para o caso de séries mensais, os testes de raiz unitárias sazonais são discutidos em Franses (1990).

⁵Para mais detalhes sobre a notação ver Franses (1990) e Franses (1991).

inferior a um ano, mensal no caso deste estudo, os modelos da classe ARIMA comumente são capazes de exibir a correlação existente entre os valores consecutivos da série. Porém, a série pode apresentar autocorrelação entre instantes de tempo distantes entre si por s ou múltiplos de s , em que s é o número que caracteriza o período sazonal⁶ (Lima, 2015). A exemplo da série de tempo utilizada neste estudo, por volta do mês de julho há um pico em relação aos demais meses do ano, então a correlação entre os meses de julho dos anos da amostra possivelmente é alta. Nesse sentido, os modelos ARIMA sazonais, denominados SARIMA, cumprem a condição de modelar a correlação sazonal

De um modo geral, os modelos SARIMA são uma combinação dos modelos ARIMA(p, d, q) e ARIMA(P, D, Q) _{s} sazonal. Além dos componentes AR(p), MA(q) e d diferenciações consecutivas, os modelos SARIMA incorporam também os componentes autorregressivos sazonais, AR(P), média móvel sazonal, MA(Q), e D diferenciações sazonais necessárias caso a série apresente raiz unitária sazonal. Assim, tem-se a denominação do modelo multiplicativo mais geral e que considera a sazonalidade, em que os fatores sazonais e não sazonais trabalham de forma multiplicativa, SARIMA (p, d, q)x(P, D, Q) _{s} , sendo descrito por:

$$\phi(L)\Phi(L)(1-L)^d(1-L^d)^DY_t = \theta(L)\Theta(L)\varepsilon_t \quad (2)$$

O objetivo principal de modelar uma série de tempo é realizar previsões de seus valores futuros. Nessa perspectiva, os modelos ARIMA são apropriados para se obter previsões de curto prazo (Morettin e Tolo, 2006). A identificação dos modelos candidatos a gerador da série passa pela análise da FAC e da FACP. Segundo Bueno (2012), o correlograma auxilia na identificação dos modelos ARIMA. Entretanto, pelo fato de a FAC apresentar um comportamento em formato senoide, indicando a presença de sazonalidade na série, foram especificados modelos ARIMA sazonais candidatos a gerador da série. Seguindo a recomendação de Lütkepohl e Krätzig (2004), foram ajustados modelos de ordem baixa, no presente estudo, foram dez, para identificar o de melhor ajustamento, valendo-se dos critérios de informação de Akaike e Schwarz, em que o fundamento de escolha se dá pelos critérios de informação que apresentarem menor valor.

Por isso, ao encontrar um modelo adequado, passa-se à última etapa, que consiste em realizar previsões. Nesse caso, há dois tipos de previsões possíveis, a estática e a dinâmica. A previsão estática se refere à previsão da observação atual utilizando o valor observado no período anterior e não o valor estimado. Isso significa que, para prever Y_{T+h+s} usa-se o valor $Y_{T+h+s-1}$. Enquanto a previsão dinâmica, utilizada nesse estudo, usa o valor estimado na observação anterior e não o valor observado na previsão da observação atual, ou seja, é uma previsão em cima de previsão. Isso significa que, para prever Y_{T+h+s} usa-se o valor $\hat{Y}_{T+h+s-1} = E[Y_{T+h+s-1}]$.

⁶Nesse caso, $s = 12$ para dados mensais.

Para encontrar os valores estimados e previstos é possível utilizar duas estratégias: a primeira delas consiste em ajustar o modelo para as T observações da amostra, calcular os valores previstos pelo modelo e calcular as medidas de qualidade das previsões. A outra alternativa, adotada no presente estudo, considera uma amostra com T observações, no entanto ajusta-se o modelo para $T - H$ períodos, deixando de fora H observações. A partir do modelo ajustado, calculam-se as previsões para as H observações e as medidas de qualidade das previsões. Assim, obtém-se o desempenho preditivo do modelo para períodos fora da amostra, mensurado em relação aos valores observados da série.

Portanto, ao fazer previsões com o modelo estimado para um período que se dispõe dos dados, existem mecanismos capazes de avaliar a qualidade das previsões, a fim de validar as previsões e conferir robustez ao modelo. Duas medidas são utilizadas para avaliar a qualidade da previsão: Raiz Quadrada do Erro Quadrado Médio (RQEQM) e Erro Absoluto Médio (EAM), especificadas como:

$$RQEQM = \sqrt{\sum_{t=T+1}^{T+h} \frac{(Y_t - \hat{Y}_t)^2}{h}} \quad (3)$$

$$EAM = \sum_{t=T+1}^{T+h} \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{h} \quad (4)$$

Ambas as medidas se valem de valores menores para garantir a qualidade das previsões dos modelos, isso significa que, quanto menores os coeficientes, melhor a performance preditiva do modelo.

3.2 Fonte de Dados

A série utilizada se refere à área total (em km^2) sob alerta de desmatamento na Amazônia Legal. A periodicidade dos dados é mensal, com início em agosto de 2015 e com término em abril de 2022, totalizando 81 observações. Seis observações de fora da amostra, de maio a outubro de 2022, foram separadas para comparar com o modelo a ser ajustado, a fim de verificar a qualidade de ajuste das previsões realizadas pelo modelo. Cada observação foi obtida por meio do somatório dos alertas de desmatamento dos estados que compõem a Amazônia Legal. As classes mapeadas que compõem o desmatamento no sistema DETER-B se referem ao desmatamento com solo exposto, desmatamento com vegetação e mineração (Diniz et al., 2015).

4. Resultados

A Figura 1 apresenta o comportamento da área total (em km^2) sob alerta de desmatamento na Amazônia Legal entre agosto de 2015 e abril de 2022. Nota-se que o comportamento da série sugere a presença de sazonalidade estocástica, à medida

que ocorrem picos nos meses intermediários dos anos e esses picos mudam de padrão a partir da segunda metade da amostra. No entanto, para verificar a ordem de integração da série, foram aplicados testes de raiz unitária.

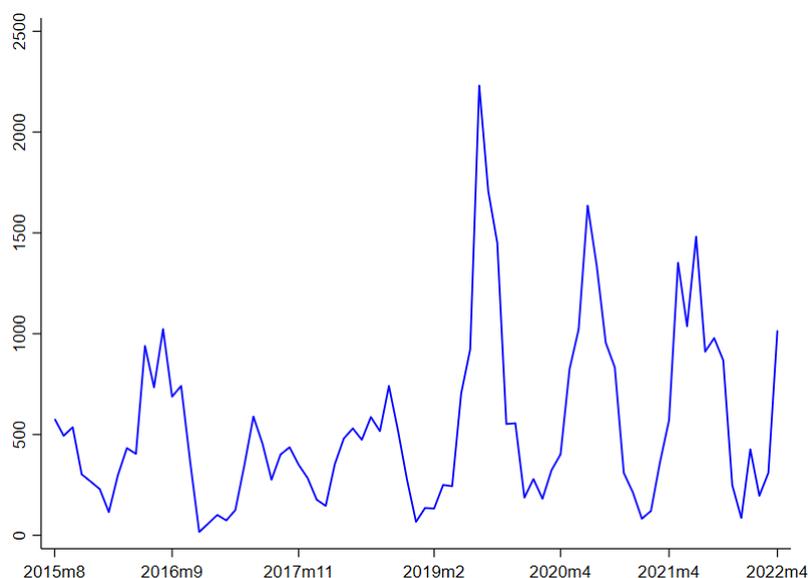


Figura 1: Área total (em km^2) sob alerta de desmatamento na Amazônia Legal.
Fonte: Elaboração própria.

A análise de séries de tempo exige que seja verificada presença ou não de raiz unitária. Para isso, ao observar o correlograma da série em nível, a Função de Autocorrelação Parcial apresenta um truncamento nas primeiras defasagens, indicando uma ordem baixa do componente autorregressivo (AR), que é uma característica de uma série estacionária. No entanto, a Função de Autocorrelação (FAC) apresenta um comportamento senoidal amortecido, sugerindo a presença de sazonalidade.

Os critérios de informação de Akaike (AIC), Schwarz (SC) e Hannan-Quinn (HQ) obtidos indicam que sejam utilizadas 3 defasagens. Desse modo, os testes Augmented Dickey-Fuller (ADF) e Philips-Perron (PP) foram aplicados considerando 3 defasagens. A Tabela 1 apresenta os resultados dos testes:

Tabela 1. Testes de raiz unitária

Augmented Dickey-Fuller (ADF)			PP	
Série	Defasagem	Valor do teste	Defasagem	Valor do teste
rea_t	3	-5,261***	3	-3,906***

Nota: *** é significativa a 1%, ** a 5% e * a 10%.
Fonte: Elaboração própria.

A hipótese nula dos testes considera que há raiz unitária na série, isto é, a série é não estacionária. Os resultados apresentados indicam que é possível rejeitar a hipótese nula de presença de raiz unitária, portanto a série é estacionária em nível. Em seguida, a partir da observação da mudança de padrão sazonal no gráfico da série, foi aplicado o teste de raiz unitária Zivot-Andrews, que permite uma quebra estrutural

na série. Como data de ocorrência da quebra estrutural, o teste definiu o mês de maio de 2019. Tal escolha pode ser justificada pelo enfraquecimento das políticas no combate ao desmatamento somado à intensificação do discurso em favor deterioração de instrumentos de política ambiental, em razão, sobretudo, da política ambiental mais favorável ao desmatamento na esteira da eleição de Presidente da República em outubro de 2018 (Rajão et al., 2021; Trancoso, 2021). A Tabela 2 apresenta o teste de raiz unitária sob mudança estrutural:

Tabela 2. Teste de raiz unitária sob mudança estrutural

Raiz Unitária com Break Test		
Série	Defasagem	Valor do teste
rea_t	3	-7,084***

Nota: *** é significativa a 1%, ** a 5% e * a 10%.

Fonte: Elaboração própria.

Como o resultado do teste foi estatisticamente significativo a 1%, é possível rejeitar a hipótese nula de que a série possui raiz unitária, ao levar em conta a existência de mudança estrutural, portanto a série é estacionária em nível. Nessa perspectiva, para o presente estudo, a não inclusão explícita de quebra estrutural não diminuiu o poder dos testes ADF e PP, de modo que eles fornecem conclusões equivalentes do teste de raiz unitária sob quebra estrutural. Os resultados dos três testes de estacionariedade indicam que haveria reversão à média de possível choques, como mudança de política ambiental. Em outras palavras, mudanças na política ambiental não teriam um impacto persistente ao longo do tempo e os alertas de desmatamento rapidamente retornariam ao seu nível normal. Contudo, o terceiro teste apontou que o padrão de reversão a média mudou em maio de 2019, conforme pode ser observado na Figura 1. Isso significa que os choques não teriam efeito persistente, mas o patamar de alertas aumentou a partir de maio de 2019.

Em seguida, foi verificada a presença de sazonalidade estocástica na série por meio do Teste de HEGY, à medida que o correlograma analisado anteriormente sugere a presença de sazonalidade. Os resultados do Teste de HEGY são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Teste HEGY de estacionariedade sazonal

π_i	P-valor simulado
Série	Defasagem
π_1	0,7710
π_2	0,0995
$\pi_3 = \pi_4$	0,0000
$\pi_5 = \pi_6$	0,0114
$\pi_7 = \pi_8$	0,0054
$\pi_9 = \pi_{10}$	0,0122
$\pi_{11} = \pi_{12}$	0,7678

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as estatísticas obtidas, o valor de π_1 foi diferente de zero, então é

possível rejeitar a hipótese nula de existência de raiz unitária não sazonal, portanto a série é estacionária, reforçando os resultados obtidos por meio dos testes ADF, PP e com quebra estrutural. Por outro lado, é possível observar que $\pi_3 = \pi_4 = 0.0000$, então a presença de uma raiz unitária sazonal não pode ser rejeitada, indicando que a série possui sazonalidade estocástica. Nesse caso, a raiz unitária indica um ciclo sazonal quadrimestral, ou seja, três ciclos de quatro meses. Tal resultado tem uma implicação política importante. Um choque que ocorra em determinado mês tem o potencial de se perpetuar de forma recorrente no mesmo mês dos anos seguintes.

Nesse sentido, ao interpretar novamente a Figura 1, percebe-se que houve um choque no meio do ano de 2019 que mudou o padrão sazonal de desmatamento na Amazônia Legal nos anos seguintes. Os resultados relacionados ao teste de estacionariedade com quebra estrutural e o teste de raiz unitária sazonal são complementares em termos de análise de políticas públicas. Enquanto o primeiro teste indica que a reversão a média mudou e que essa média aumentou a partir de maio de 2019, o segundo teste indica que o padrão sazonal é persistente ao longo do tempo e que um choque em meados de 2019 foi persistente nos mesmos meses dos anos subsequentes. De maneira geral, o resultado é que houve uma mudança para cima no padrão dos alertas a partir de 2019.

A Tabela 4 contém as dez especificações estimadas e os critérios de avaliação do melhor modelo de previsão. Conforme foi verificada a presença apenas de raiz unitária sazonal, aplicou-se apenas a diferenciação sazonal⁷. A partir dos resultados descritos na Tabela 4, a especificação que melhor se ajusta à série é o SARIMA (3,0,0)x(0,1,1)₁₂. O termo (3,0,0) significa que há três termos autoregressivos não sazonais, também que não há um termo de médias móveis não sazonal e que a série não está em primeira diferença, de acordo com os testes de raiz unitária. Já o termo (0,1,1)₁₂ indica que não há um termo autoregressivo sazonal, que há um termo de médias móveis sazonal e que a série foi diferenciada sazonalmente. Este modelo é denominado SARIMA multiplicativo, à medida que ocorre a interação multiplicativa entre os fatores sazonais e não sazonais.

Tratando-se de modelos de previsão, os valores da RQEQM e EAM indicam a qualidade das previsões. Nesse sentido, considerando sobretudo o menor valor da RQEQM dentre as especificações estimadas, a escolha da especificação citada é adequada. Portanto, os resultados encontrados sugerem que o modelo SARIMA SARIMA(3,0,0)(0,1,1)₁₂ fornece as melhores previsões para a série da área total sob alerta de desmatamento na Amazônia Legal, uma vez que apresentou menor RQEQM em comparação as demais especificações. Além disso, ao verificar as funções de autocorrelação e autocorrelação parcial da série prevista, observa-se que os resíduos estão bem ajustados, pois se encontram dentro dos limites do intervalo de confiança, o que é corroborado pelo teste de Ljung-Box, evidenciado que os resíduos são do tipo ruído branco.

⁷Uma alternativa seria estimar utilizando os dados após a verificação da quebra estrutural em maio de 2019. Contudo, isso reduziria a amostra, o que poderia comprometer a estimação dos modelos.

Tabela 4. Modelos SARIMA estimados e critérios de qualidade para o período de agosto de 2015 a abril de 2022

Especificação	R ² EQM	EAM	AIC	BIC	Ljung-Box
SARIMA(0,0,2)(1,1,0) ₁₂	316,1772	32,5555	973,6376	987,0423	0,7724
SARIMA(0,0,2)(1,1,1) ₁₂	281,9289	58,9701	975,6843	989,0889	0,8318
SARIMA(1,0,2)(1,1,0) ₁₂	334,8094	27,1406	976,2211	989,6258	0,8035
SARIMA(3,0,0)(0,1,1) ₁₂	235,5534	33,7718	980,5338	993,9385	0,7066
SARIMA(3,0,0)(1,1,0) ₁₂	303,7099	38,4780	977,4150	993,0538	0,4720
SARIMA(2,0,2)(1,1,0) ₁₂	330,1908	30,4415	980,2142	995,8529	0,8082
SARIMA(3,0,1)(1,1,0) ₁₂	309,5734	37,4311	975,5178	991,1565	0,6256
SARIMA(1,0,2)(1,1,1) ₁₂	285,7356	50,1174	976,6506	992,2894	0,8443
SARIMA(3,0,0)(1,1,1) ₁₂	273,1724	68,5135	976,9622	994,8350	0,7202
SARIMA(2,0,2)(1,1,1) ₁₂	286,8405	49,7386	976,9481	992,5868	0,8665

Fonte: Elaboração própria.

Por último, a Tabela 5 apresenta as previsões para a área sob alerta de desmatamento na Amazônia Legal seis períodos à frente, de maio de 2022 a outubro de 2022, valendo-se da especificação SARIMA(3,0,0)(0,1,1)₁₂. Para fins de comparação, os valores observados da série também são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores previstos do modelo SARIMA(3,0,0)(0,1,1)₁₂

Mês	Observado	Previsto	%Erro
Maio/2022	890,19	1067,45	19,91
Junho/2022	1108,43	1071,30	-3,35
Julho/2022	1474,73	1635,82	10,92
Agosto/2022	1655,23	1232,28	-25,55
Setembro/2022	1453,50	1145,75	-21,17
Outubro/2022	902,31	926,50	2,68

Fonte: Elaboração própria.

A partir dos valores previstos, é possível notar que as estimativas apresentam diferenças razoáveis em relação ao valor observado, exceto a previsão para os meses de junho e outubro de 2022, as quais se mostraram muito próximas do valor observado. Graficamente, ao observar a combinação entre os gráficos da série observada e da série estimada, é possível ter um panorama visual das projeções, além de sugerir possíveis explicações para as diferenças entre os valores previstos e observados. A figura 2 apresenta o gráfico das duas séries combinadas:

Ao observar a Figura 2, dois apontamentos são relevantes. O primeiro deles diz respeito ao comportamento da série entre maio e junho de 2021 e 2022, em que houve uma queda repentina dos valores observados nos respectivos anos, mas que não foram captados pelo modelo. Por outro lado, o mês de janeiro de 2022 apresentou um pico significativo de alertas de desmatamento em comparação aos demais anos da amostra, o que também não foi captado pelo modelo. Por último, após a mudança estrutural identificada na série em maio de 2019, o pico anual de alertas de desmatamento tem apresentado uma suavização sutil nesses valores nos anos subsequentes. Ademais, o erro de previsão para o pico no meio do ano de 2019 indica que aquele pico foi um evento inesperado, contudo, os picos observados nos anos subsequentes nos mesmos

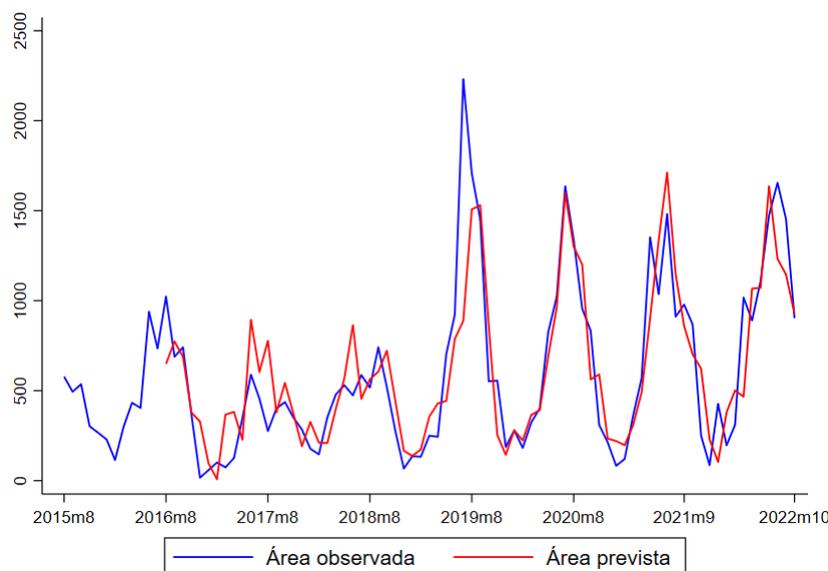


Figura 2: Área (em km^2) sob alerta de desmatamento observada e prevista.
Fonte: Elaboração própria.

meses seriam facilmente previstos dentro do modelo.

No entanto, é possível observar que a série prevista se ajusta bem no horizonte de curto prazo proposto, que são seis meses. Então, o modelo estimado atinge o objetivo de fazer uma previsão dos dados no curto prazo, dispondo dos dados nesse mesmo período fora da amostra, para fins de comparação. No entanto, alguns valores destoantes podem interferir na qualidade da previsão, a exemplo do pico de área sob alerta de desmatamento em junho de 2019, próximo ao período em que foi identificada a quebra estrutural. Dessa maneira, ao identificar picos de sazonalidade significativos, sobretudo padrões estocásticos ao longo da série, é preciso que as motivações por trás dessas mudanças sejam investigadas mais a fundo, a fim de compreender o fenômeno por trás desses valores e, conseqüentemente, encontrar resultados mais robustos. Assim, os formuladores de política pública conseguem antecipar os picos de alertas de desmatamento com certa antecedência, ganhando tempo, portanto, para planejar ações apropriadas.

5. Considerações Finais

A preservação da Amazônia Legal representa um desafio constante para o Brasil e requer ações coordenadas e efetivas das instituições públicas de preservação junto ao governo federal. Nesse sentido, utilizar modelos de previsão para prever a área sob alertas de desmatamento é uma ferramenta importante, pois a sua utilização, sobretudo no curto prazo, possibilita a ação antecipada da fiscalização em áreas que estão em estágio inicial de desmatamento e que foram captadas pelo sistema de monitoramento via satélite. Sendo assim, em conjunto com outras políticas ambientais, a utilização do sistema de avisos de desmatamento pode representar uma ferramenta

eficaz de prevenção ao desmatamento, como também pode ser útil na elaboração de políticas públicas vinculadas a redução da perda florestal.

O diferencial deste estudo reside na proposta de integrar modelos ARIMA na previsão de alertas de desmatamento, buscando preencher lacunas na literatura sobre meio ambiente. Essa abordagem não apenas contribui para uma compreensão mais detalhada das dinâmicas do desmatamento na Amazônia, mas também sugere uma ferramenta adicional para embasar políticas ambientais preventivas. O estudo avança ao oferecer não apenas uma análise retrospectiva, mas também uma ferramenta para anteciper trajetórias futuras de desmatamento. Essa abordagem tem implicações práticas para a formulação de políticas e estratégias de conservação, permitindo uma resposta mais proativa diante das potenciais mudanças nas taxas de desmatamento.

Este trabalho apresenta pelo menos duas implicações para as políticas ambientais direcionadas à redução do desmatamento na Amazônia Legal. A primeira diz respeito à mudança no padrão dos alertas de desmatamento em 2019, seja pelo teste de quebra estrutural, seja pelo teste de sazonalidade. Assim, políticas públicas têm que ser direcionadas para reverter tal cenário. Nessa perspectiva, ao reconhecer quebras estruturais, é possível ajustar políticas ambientais de maneira mais precisa. Por exemplo, se a quebra estrutural está relacionada a mudanças nas políticas governamentais, essa compreensão é crucial para orientar ações regulatórias e de fiscalização. A segunda implicação está relacionada ao alto grau de previsibilidade dos alertas de desmatamento 6 meses à frente. De posse dos resultados deste trabalho, o gestor de política pública pode se planejar para aplicar recursos de forma eficaz e não ser surpreendido com números altos de alertas de desmatamento.

No entanto, é importante reconhecer as limitações inerentes a este estudo. A análise agregada, embora ofereça uma visão geral robusta, pode negligenciar nuances locais importantes. A dificuldade na aplicação de políticas agregadas pode decorrer dessa limitação, indicando a necessidade de estratégias mais granulares para combater o desmatamento, considerando as especificidades de cada estado. As barreiras impostas pelas condições climáticas na obtenção de dados precisos podem influenciar a precisão das análises, como a presença de nuvens. Portanto, é importante abordar essas limitações em estudos futuros para aprimorar a confiabilidade das conclusões e previsões, especialmente em uma região onde as condições meteorológicas podem ser adversas.

Além disso, a base de dados utilizada ser recente e não possuir um horizonte de tempo longo, impossibilita a comparação entre períodos que tiveram cenários ambientais, climáticos ou econômicos similares, como períodos de implementação de políticas ou de instabilidade institucional. Contudo, uma análise desagregada por estados é um complemento importante, à medida que os resultados do monitoramento por estado podem ser utilizados na elaboração de políticas preventivas ao desmatamento focalizadas a nível regional.

Em relação a perspectivas subsequentes, este estudo se apresenta como um ponto de partida para futuras pesquisas. A introdução de modelos ARIMA e alertas de desmatamento na análise temporal representa uma abordagem promissora que pode ser refinada e expandida. Pesquisas adicionais podem explorar modificações nos modelos para enfrentar desafios específicos da região, considerando variáveis climáticas, socioeconômicas e políticas, como abordagem de variáveis instrumentais considerando a cobertura de nuvens como um fator exógeno aos alertas de desmatamento. Ademais, incluir elementos relacionados ao aprendizado de máquina pode ser uma alternativa para superar os desafios relacionados à presença de nuvens.

Ainda, há outras possibilidades de análise envolvendo áreas sob alertas de desmatamento no Brasil, não apenas da Amazônia Legal, mas também sobre o Cerrado. Uma verificação possível se refere a análise da volatilidade, bastante aplicada em séries financeiras. Nessa ótica, é possível investigar a variabilidade dos alertas de desmatamento através dos modelos da classe ARCH/GARCH, os quais permitem analisar a persistência dos choques e presença de efeitos assimétricos entre choques positivos e negativos, por exemplo, entre políticas de combate ao desmatamento e ações temerárias de instabilidade institucional.

Referências

- Amigo, I. (2020). When will the amazon hit a tipping point? *Nature*, 578(7796):505–508.
- Arima, E. Y., Barreto, P., Araújo, E., e Soares-Filho, B. (2014). Public policies can reduce tropical deforestation: Lessons and challenges from brazil. *Land use policy*, 41:465–473.
- Arraes, R. d. A., Mariano, F. Z., e Simonassi, A. G. (2012). Causas do desmatamento no brasil e seu ordenamento no contexto mundial. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 50:119–140.
- Assunção, J., Gandour, C., e Rocha, R. (2023). Deter-ing deforestation in the amazon: environmental monitoring and law enforcement. *American Economic Journal: Applied Economics*, 15(2):125–156.
- Bowman, M. S., Soares-Filho, B. S., Merry, F. D., Nepstad, D. C., Rodrigues, H., e Almeida, O. T. (2012). Persistence of cattle ranching in the brazilian amazon: A spatial analysis of the rationale for beef production. *Land use policy*, 29(3):558–568.
- Box, G. E. P. e Jenkins, G. M. (1976). Time series analysis: Forecasting and control. *Holden-Day*, revised ed.
- Brandão, A. S. P., Rezende, G. C. d., e Marques, R. W. d. C. (2006). Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente. *Economia Aplicada*, 10:249–266.

- BRASIL (2004). Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na amazônia legal. *Presidência da Casa Civil*.
- Brito, B., Barreto, P., Brandão, A., Baima, S., e Gomes, P. H. (2019). Stimulus for land grabbing and deforestation in the brazilian amazon. *Environmental Research Letters*, 14(6):064018.
- Bueno, R. D. L. d. S. (2012). *Econometria de séries temporais*. Cengage Learning.
- Burgess, R., Costa, F., e Olken, B. A. (2019). The brazilian amazon's double reversal of fortune.
- Castelo, T. B., Adami, M., Almeida, C. A., e de Almeida, O. T. (2018). Governos e mudanças nas políticas de combate ao desmatamento na amazônia. *Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 28:0125–148.
- Coelho-Junior, M. G., Valdiones, A. P., Shimbo, J. Z., Silgueiro, V., Rosa, M., Marques, C. D. L., Oliveira, M., Araújo, S., e Azevedo, T. (2022). Unmasking the impunity of illegal deforestation in the brazilian amazon: a call for enforcement and accountability. *Environmental Research Letters*, 17(4):041001.
- Contini, E., Gasques, J. G., Leonardi, R. B. d. A., e Bastos, E. T. (2006). Evolução recente e tendências do agronegócio. *Revista de política agrícola*, 15(1):5–28.
- Costa, A. d. S., Queiroz, J. C. B., Chermont, L. S., Lameira, O. A., de Souza, E. B., Diniz, M. B., Moura, H. P., e Costa, D. L. C. (2021). Deforestation forecasts in the legal amazon using intervention models. *Research, Society and Development*, 10(4):e8710413787.
- Diniz, C. G., de Almeida Souza, A. A., Santos, D. C., Dias, M. C., Da Luz, N. C., De Moraes, D. R. V., Maia, J. S., Gomes, A. R., da Silva Narvaes, I., Valeriano, D. M., et al. (2015). Deter-b: The new amazon near real-time deforestation detection system. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 8(7):3619–3628.
- Effrosynidis, D., Spiliotis, E., Sylaios, G., e Arampatzis, A. (2023). Time series and regression methods for univariate environmental forecasting: An empirical evaluation. *Science of The Total Environment*, 875:162580.
- Enders, W. (2015). Applied econometric time series fourth edition. *New York (US): University of Alabama*.
- FAO (2020). Global forest resources assessment 2020: Main report. rome.
- Fearnside, P. M. (2017). Como sempre, os negócios: o ressurgimento do desmatamento na amazônia brasileira. *Yale Environment*, 360:18.
- Ferreira, M. D. P. e Coelho, A. B. (2015). Desmatamento recente nos estados da amazônia legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 53:91–108.

- Ferreira, M. D. P. e Féres, J. G. (2020). Farm size and land use efficiency in the brazilian amazon. *Land Use Policy*, 99:104901.
- Ferreira Filho, J. B. d. S., Ribera, L., e Horridge, M. (2015). Deforestation control and agricultural supply in brazil. *American Journal of Agricultural Economics*, 97(2):589–601.
- Finer, M., Novoa, S., Weisse, M. J., Petersen, R., Mascaro, J., Souto, T., Stearns, F., e Martinez, R. G. (2018). Combating deforestation: From satellite to intervention. *Science*, 360(6395):1303–1305.
- Franses, P. H. (1990). Testing for seasonal unit roots in monthly data. *Econometric Institute Report*.
- Franses, P. H. (1991). Seasonality, non-stationarity and the forecasting of monthly time series. *International Journal of forecasting*, 7(2):199–208.
- Gandour, C. (2021). Políticas públicas para proteção da floresta amazônica: O que funciona e como melhorar. *Amazônia 2030*.
- Ghysels, E., Lee, H. S., e Noh, J. (1994). Testing for unit roots in seasonal time series: Some theoretical extensions and a monte carlo investigation. *Journal of econometrics*, 62(2):415–442.
- Hylleberg, S., Engle, R. F., Granger, C. W., e Yoo, B. S. (1990). Seasonal integration and cointegration. *Journal of econometrics*, 44(1-2):215–238.
- INPE (2019). *Projetos e Pesquisa: DETER*. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais.
- INPE (2020). *Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Brasileira por Satélite*. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais.
- INPE (2022). *TerraBrasilis: PRODES (desmatamento)*. Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais.
- Kalamandeen, M., Gloor, E., Mitchard, E., Quincey, D., Ziv, G., Spracklen, D., Spracklen, B., Adami, M., Aragão, L. E., e Galbraith, D. (2018). Pervasive rise of small-scale deforestation in amazonia. *Scientific reports*, 8(1):1–10.
- Kaur, J., Parmar, K. S., e Singh, S. (2023). Autoregressive models in environmental forecasting time series: a theoretical and application review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8):19617–19641.
- Lima, J. E. (2015). *Curso básico de análise e previsão de séries temporais*. Departamento de Economia Rural. Universidade Federal de Viçosa.
- Lütkepohl, H. e Krätzig, M. (2004). *Applied time series econometrics*. Cambridge university press.

- Malingreau, J.-P., Eva, H., e de Miranda, E. E. (2012). Brazilian amazon: a significant five year drop in deforestation rates but figures are on the rise again. *Ambio*, 41(3):309–314.
- Mataveli, G., de Oliveira, G., Chaves, M. E., Dalagnol, R., Wagner, F. H., Ipia, A. H., Silva-Junior, C. H., e Aragão, L. E. (2022). Science-based planning can support law enforcement actions to curb deforestation in the brazilian amazon. *Conservation Letters*, Página e12908.
- Mayfield, H., Smith, C., Gallagher, M., e Hockings, M. (2017). Use of freely available datasets and machine learning methods in predicting deforestation. *Environmental modelling & software*, 87:17–28.
- Mello, N. G. R. d. e Artaxo, P. (2017). Evolução do plano de ação para prevenção e controle do desmatamento na amazônia legal. *Revista do Instituto de Estudos Brasileiros*, Página 108–129.
- Moffette, F., Alix-Garcia, J., Shea, K., e Pickens, A. H. (2021). The impact of near-real-time deforestation alerts across the tropics. *Nature Climate Change*, 11(2):172–178.
- Montibeller, B., Knoch, A., Virro, H., Mander, Ü., e Uuemaa, E. (2020). Increasing fragmentation of forest cover in brazil's legal amazon from 2001 to 2017. *Scientific reports*, 10(1):5803.
- Morettin, P. A. e Toloi, C. (2006). Análise de séries temporais. In: *Análise de séries temporais*, Página 538–538.
- Rajão, R., Schmitt, J., Nunes, F., e Soares-Filho, B. (2021). Dicotomia da impunidade do desmatamento ilegal. *Policy Brief CSR/LAGESA/UFMG*.
- Reydon, B. P., Fernandes, V. B., e Telles, T. S. (2020). Land governance as a pre-condition for decreasing deforestation in the brazilian amazon. *Land Use Policy*, 94:104313.
- Ronderos, N. (2015). *Seasonal Unit Root Test*. Add-in EViews.
- Rosa, I. M., Souza Jr, C., e Ewers, R. M. (2012). Changes in size of deforested patches in the brazilian amazon. *Conservation biology*, 26(5):932–937.
- Sparovek, G., Reydon, B. P., Pinto, L. F. G., Faria, V., de Freitas, F. L. M., Azevedo-Ramos, C., Gardner, T., Hamamura, C., Rajão, R., Cerignoni, F., et al. (2019). Who owns brazilian lands? *Land use policy*, 87:104062.
- Trancoso, R. (2021). Changing amazon deforestation patterns: Urgent need to restore command and control policies and market interventions. *Environmental Research Letters*, 16(4):041004.
- Valdes, C., Hjort, K., e Seeley, R. (2020). Brazil's agricultural competitiveness: Recent growth and future impacts under currency depreciation and changing macroeconomic conditions. *Economic Research Service*.

Vale, M. M., Berenguer, E., de Menezes, M. A., de Castro, E. B. V., de Siqueira, L. P., e Rita de Cássia, Q. P. (2021). The covid-19 pandemic as an opportunity to weaken environmental protection in brazil. *Biological conservation*, 255:108994.

Vieira Filho, J. E. R. (2016). Expansão da fronteira agrícola no brasil: desafios e perspectivas.

Wang, X., Smith-Miles, K., e Hyndman, R. (2009). Rule induction for forecasting method selection: Meta-learning the characteristics of univariate time series. *Neurocomputing*, 72(10-12):2581–2594.

 Este artigo está licenciado com uma *CC BY 4.0 license*.