



Universidade de Brasília  
IG/IQ/IB/FACE-ECO/CDS  
Ciências Ambientais

Matheus Ribeiro Dias dos Santos  
Waldeck Vaz de Sousa Gomes

# **Rastreabilidade de Madeira na Amazônia: Uso de Isótopos Estáveis**

Brasília  
2024

Matheus Ribeiro Dias dos Santos  
Waldeck Vaz de Sousa Gomes

# **Rastreabilidade de Madeira na Amazônia: Uso de Isótopos Estáveis**

Trabalho Interdisciplinar Integrado de  
Conclusão de Curso apresentado como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador(a): Prof. Gabriela Bielefeld  
Nardotto

Brasília  
2024

## Ficha Catalográfica

DEVE SER ELABORADA POR UM BIBLIOTECÁRIO OU GERADA PELO GERADOR AUTOMÁTICO DISPONÍVEL NO SITE DA BCE: <http://www.bce.unb.br/elaboracao-de-fichas-catalograficas/>

DEVE SER INSERIDA NO **VERSO DA FOLHA DE ROSTO**. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011, p. 7).

### Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

```
?U47t      Último/sobrenome, Prenome seguido demais nomes
           Título: subtítulo / Prenome seguido demais nomes
           Último/sobrenome; orientador Prenome Último/sobrenome; co
           orientador Prenome Último/sobrenome. -- Brasília, Ano.
           xx p.

           Monografia (Graduação - Curso) -- Universidade de
           Brasília, Ano.

           1. Assunto principal. 2. Assunto específico. 3. Assunto
           específico. 4. Assunto específico. 5. Assunto específico. I.
           Último/sobrenome, Prenome, orient. II. Último/sobrenome,
           Prenome, co-orient. III. Título.
```

Matheus Ribeiro Dias dos Santos

Waldeck Vaz de Sousa Gomes

## **Rastreabilidade de Madeira na Amazônia: Uso de Isótopos Estáveis**

Trabalho Interdisciplinar Integrado de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

**Data da aprovação:** 19/09/2024

---

Gabriela Bielefeld Nardotto — Orientador  
Doutora em Ecologia Aplicada  
Professora do Departamento de Ecologia/UnB

---

Uidemar Moraes Barral — membro interno  
Doutor em Produção Vegetal  
Professor do Instituto de Geociências/UnB

---

Lívia Marques Borges — Membro externo  
Mestre em Manejo Florestal  
Perita Criminal Federal

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por essa experiência maravilhosa e engrandecedora.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Gabriela Bielefeld Nardotto pelo convite e oportunidade de aprender, pelo acolhimento, orientação, ensinamentos, incentivo e paciência, exemplo de professora e pessoa.

À toda equipe do *Environmental Isotope Studies* (EIS), pela colaboração durante todo o período de realização deste trabalho, nossos sinceros agradecimentos a cada um do grupo pelas amizades, companheirismo, apoio e paciência.

Ao Alexandre Bahia Gontijo e Fábio José Viana Costa, em especial, pelos esforços dedicados, pela colaboração, apoio, disponibilidade e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A contribuição de vocês foi essencial para a realização deste projeto.

Aos professores do curso de Ciências Ambientais pela formação sólida e pelas oportunidades de aprendizado que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao IBAMA pela colaboração ao fornecer as amostras necessárias para a realização deste estudo. Sua parceria foi fundamental para a obtenção de resultados precisos

Aos membros da banca examinadora, Lívia Marques Borges e Uidemar Moraes Barral pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho, pelos valiosos comentários e sugestões que contribuíram para o aprimoramento da pesquisa.

### Agradecimentos gerais

Deus, por me guiar e me fortalecer ao longo desta jornada acadêmica.

Ao meu avô/pai, Valdeque Vaz, à minha mãe, Marcella Monturil e à minha avó/mãe, Nleide Helena, pela educação, amor e apoio incondicional que sempre me deram. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Aos meus irmãos e primos, em especial meu parceiro Gustavo Monturil, por estar ao meu lado nos momentos de dificuldade e celebrar comigo cada vitória.

Aos meus tios, Lia Raquel e Jorge Alexandre, por todo o incentivo, conselhos e suporte ao longo desta jornada. Vocês são exemplos de inspiração e força para mim.

Ao meu amigo e parceiro de TCC, Matheus Ribeiro, pela parceria, dedicação, paciência e companheirismo em cada etapa deste trabalho. Sua colaboração foi essencial para o nosso sucesso.

Aos meus amigos de infância pelo incentivo e pelas palavras de encorajamento que me motivaram ao longo desta jornada.

Waldeck Vaz.

Começo agradecendo a Jah, pela força para não desistir, paciência para suportar o tempo de espera até chegar nesse momento tão almejado, pela paixão gerada por buscar cada vez mais conhecimento e pelo amor à natureza.

A minha família, que sempre acreditou em mim e no meu potencial, que ainda sonham comigo, e por poder dividir com eles os sonhos que se tornam realidade.

Em especial àqueles que sempre estiveram do meu lado minha mãe Rosângela Maria, a minha prima Luciana Ribeiro, a minha cria Gabriel Brandão por me oferecer respiro em momentos de tensão, as minhas sobrinhas Victória Thayma e Thaissa Giovanna, e meus primo Caio Ribeiro e Israel Dias, por tornarem a vida mais leve.

Agradeço também aos meus amigos de graduação que sofreram comigo durante esse tempo e juntos nós apoiamos para conseguir o tão sonhado diploma, valeu por estarem perto Waldeck Vaz, Paloma Alvim, Davi Camargo, Greta Gabriela, Rafael Miranda, Bruno Daudt e todos os outros que participaram dessa fase.

Em especial ao meu parceiro de trabalhos Waldeck Vaz, que mesmo sendo tão diferente de mim conseguimos encontrar na Ciências Ambientais um ponto em comum que nos fez com tempo desenvolver uma amizade e parceria.

Aos amigos que me salvaram nos surtos e sufocos vividos durante esse período Samanta Serrano, Midiã Alves, Caio Dias ao grupo de amigos Sereias, obrigade por dividirem a vida comigo e por estarem juntos nos momentos bons e ruins.

Aos meus professores, que sempre me inspiraram e fizeram que eu acreditasse que a educação é uma ferramenta de mudança de vidas e do sistema.

Matheus Ribeiro

## RESUMO

A exploração madeireira das florestas desempenha um papel importante na economia do país e da região Amazônica, entretanto, mesmo com vários mecanismos de controle, ainda existem dificuldades significativas para garantir o cumprimento das leis, devido ao elevado número de procedimentos suscetíveis a fraudes. A alta vulnerabilidade a fraudes contribui para a persistência da exploração ilegal e compromete a eficácia dos mecanismos de controle estabelecidos. A exploração madeireira ilegal tem causado danos à integridade da floresta e aos povos da Amazônia. Portanto, é necessário desenvolver novos mecanismos de controle e fiscalização. Nesse contexto, a utilização de isótopos estáveis para o rastreamento de madeira pode ser uma ferramenta crucial no combate à exploração ilegal, uma vez que as análises isotópicas podem agregar um dado material, para além do apenas documental, no controle da cadeia produtiva da madeira nativa. O objetivo do estudo foi verificar, a partir de amostras de madeira coletadas em um armazém de retaguarda pelo IBAMA, a região de origem das árvores usando a metodologia isotópica e cruzar essa informação com a localidade declarada no Documento de Origem Florestal (DOF). Foram analisadas 9 amostras de madeira apreendidas no armazém de retaguarda em Itajaí-SC e cedidas pelo IBAMA. Essas amostras passaram por três análises isotópicas: uma na madeira bruta, realizada pelo laboratório CENA/USP, e duas outras na madeira bruta e na extração de celulose, realizadas pelo laboratório CIE/UNESP. Os dados das análises foram comparados entre os valores isotópicos de carbono obtidos por ambos os laboratórios. Observou-se uma pequena diferença entre os resultados. Além disso, foram comparados os valores isotópicos de carbono, oxigênio e hidrogênio obtidos pelo laboratório CIE para a madeira bruta e a celulose. Para carbono e oxigênio, as diferenças foram pequenas, enquanto para hidrogênio houve uma grande discrepância. Utilizando os valores isotópicos de carbono do CENA/USP e de oxigênio da celulose do CIE/UNESP, foram realizados testes de atribuição para identificar o provável local de origem das madeiras. Entre as 9 amostras, 3 ficaram no limite do local de origem, 3 próximas e 3 distantes. Os dados obtidos mostraram uma eficácia no processo de rastreabilidade de madeira. Concluiu-se que novos estudos sobre análises isotópicas devem ser realizados para ampliar o banco de dados, possibilitando uma maior precisão na rastreabilidade de madeira no futuro.

**Palavras-chave:** Exploração madeireira, Documento de Origem Florestal (DOF), Rastreabilidade isotópica

## ABSTRACT

Logging plays an important role in the economy of the country and the Amazon region. However, even with several control mechanisms, there are still significant difficulties in ensuring compliance with the law, due to the high number of procedures susceptible to fraud. The high vulnerability to fraud contributes to the persistence of illegal logging and compromises the effectiveness of established control mechanisms. Illegal logging has caused damage to the integrity of the forest and to the people of the Amazon. Therefore, it is necessary to develop new control and inspection mechanisms. In this context, the use of stable isotopes for tracking timber can be a crucial tool in combating illegal logging, since isotopic analyses can add material data, beyond just documentary data, in the control of the native timber production chain. The objective of the study was to verify, from timber samples collected in a back-up warehouse by IBAMA, the region of origin of the trees using the isotopic methodology and to cross-reference this information with the location declared in the Forest Origin Document (DOF). Nine wood samples seized from the back-up warehouse in Itajaí-SC and provided by IBAMA were analyzed. These samples underwent three isotopic analyses: one on the raw wood, performed by the CENA/USP laboratory, and two others on the raw wood and cellulose extraction, performed by the CIE/UNESP laboratory. The data from the analyses were compared between the carbon isotopic values obtained by both laboratories. A small difference was observed between the results. In addition, the isotopic values of carbon, oxygen and hydrogen obtained by the CIE laboratory for the raw wood and cellulose were compared. For carbon and oxygen, the differences were small, while for hydrogen there was a large discrepancy. Using the carbon isotopic values from CENA/USP and the oxygen values of the cellulose from CIE/UNESP, attribution tests were performed to identify the probable place of origin of the wood. Among the 9 samples, 3 were on the edge of the place of origin, 3 were close and 3 were distant. The data obtained showed effectiveness in the wood traceability process. It is concluded that new studies on isotopic analysis should be carried out to expand the database, enabling greater precision in wood traceability in the future.

**Keywords:** Logging, Forest Origin Document (DOF), Isotopic traceability



## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Rodovia Transamazônica.

**Figura 2.** Taxas de desmatamento na Amazônia Legal entre 1988 e 2023.

**Figura 3.** Esquema Sinaflor, Sinaflor+, DOF e Pau-Brasil.

**Figura 4.** 10 Municípios com mais exploração não autorizada, Agosto de 2020 e Julho de 2021, SISMEX

**Figura 5.** Mapeamento da exploração madeireira na Amazônia, Agosto de 2020 e Julho de 2022, SISMEX.

**Figura 6.** Distribuição de Áreas Desmatadas na Amazônia Legal por Estados e Classes de Uso do Solo

**Figura 7.** Análise do Esquema DOF para Controle da Exploração Madeireira no Brasil

**Figura 8.** Amostras de madeiras coletada no armazém de retaguarda, Itajaí-SC.

**Figura 9.** Valores de comparação entre o  $\delta^{13}\text{C}$  do laboratório CIE/UNESP e do laboratório CENA/USP.

**Figura 10.** Valores obtidos de  $\delta^{13}\text{C}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP,  $\delta^{13}\text{C}$  na madeira bruta CENA/USP e celulose CIE/UNESP,  $\delta^2\text{H}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP e  $\delta^{18}\text{O}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP.

**Figura 11.** Possíveis localizações, amostras 7,8 e 9.

**Figura 12.** Possíveis localizações, amostras 1,2 e 3.

**Figura 13.** Possíveis localizações, amostras 4,5 e 6.

## **LISTA DE TABELAS**

**Tabela 1.** Tipos de produtos florestais.

**Tabela 2.** Dados para emissão do DOF.

**Tabela 3.** Média  $\pm$  Desvio Padrão das Amostras – CENA/USP.

**Tabela 4.** Diferença entre os valores isotópicos de madeira bruta e celulose.

## **LISTA DE QUADROS**

**QUADRO 1.** Técnicas de análise para madeira, GNTT.

**QUADRO 2.** Localização declarada no DOF.

**QUADRO 3.** Características biológicas das amostras.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT.** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AUTEX.** Autorização de Exploração Florestal
- CENA/USP.** Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura
- CIE/UNESP.** Centro de Isótopos Estáveis da Universidade Estadual Paulista
- CONAMA.** Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CTF.** Cadastro Técnico Federal
- DOF.** Documento de Origem Florestal
- GNTT.** Global Timber Tracking Network
- IAEA.** International Atomic Energy Agency
- IBAMA.** Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- IBGE.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IMAZON.** Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
- INCT-MRFOR.** Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Maderas e Recursos Florestais
- INMETRO.** Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
- MMA.** Ministério do Meio Ambiente
- PMFS.** Plano de Manejo Florestal Sustentável
- POA.** Plano Operacional Anual
- PPCDAm.** Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
- SINAFLOR.** Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais
- SIMEX.** Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira
- SISNAMA.** Sistema Nacional de Meio Ambiente
- UF.** Unidade da Federação
- UPA's.** Unidades de Produção Anual
- USGS.** United States Geological Survey
- VPDB.** Vienna Pee Dee Belemnite
- VSMOW.** Água Oceânica Média de Viena

## LISTA DE SÍMBOLOS

**C<sub>3</sub>** Ciclo de Calvin

**C<sub>4</sub>** Hatch-Slack

**δ<sup>13</sup>C** Isótopo de carbono 13

**D<sub>ab</sub>** Distância euclidiana

**δ<sup>18</sup>O** Isótopo de carbono 18

**δ<sup>2</sup>H** Isótopo de carbono 18

**O(n)** Ordem de um algoritmo

**R** Razão isotópica

**δ** Valor isotópico

**Σ** Somatório

**%** Porcentagem

**‰** Por mil

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	13
2	Objetivos .....	15
2.1	Objetivo Geral .....	15
2.2	Objetivo Específico .....	15
3	Revisão de Literatura .....	15
3.1	Desmatamento da Floresta Amazônica .....	15
3.2	Exploração Madeireira .....	18
3.3	Monitoramento da Exploração Madeireira na Amazônia .....	21
3.4	Manejo Florestal na Amazônia Brasileira: Legalidade versus Ilegalidade .....	23
3.5	Documento de Origem Florestal (DOF): Histórico e regulamentação .....	25
3.6	Falhas Sistema DOF .....	29
3.7	Métodos para rastreabilidade de madeira .....	30
3.8	Isótopos estáveis .....	33
3.9	Isoscapes e Atribuição Isotópica .....	35
4	Metodologia .....	36
4.1	Amostragem .....	36
4.2	Análises Isotópicas .....	38
4.3	Testes de Atribuição Isotópica .....	39
5	Resultados e discussão .....	39
5.1	Comparação dos Métodos Isotópicos dos Laboratórios CENA-USP e CIE-UNESP .....	39
5.2	Diferenças Isotópicas entre Madeira Bruta e Celulose .....	41
5.3	Testes de Atribuição .....	42
6	Considerações Finais .....	46
7	Referências .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é uma das regiões mais importantes do mundo em termos de biodiversidade e regulação climática. Coberta por vastas extensões de vegetação densa, ela desempenha um papel vital no estoque do carbono, na manutenção dos regimes hídricos e na preservação de uma infinidade de espécies de flora e fauna. No entanto, a Amazônia enfrenta sérios desafios devido ao desmatamento e à exploração ilegal de recursos, particularmente a madeira (FEARNSIDE,2022)

A extração de madeira na Amazônia não só causa a perda de biodiversidade e a degradação ambiental, mas também está ligada a diversos problemas sociais e econômicos, como conflitos fundiários e a violação de direitos dos povos e comunidades tradicionais e indígenas

A exploração de madeira frequentemente inicia o processo de degradação florestal, com uma área podendo ser submetida a várias extrações. Inicialmente, os madeireiros cortam as árvores maiores e mais valiosas. Em seguida, voltam duas ou três vezes para retirar outras árvores menores das espécies mais valiosas (MONTEIRO,2004)

A exploração de madeira realizada de forma seletiva ilegal causa diversos danos à floresta, como a perda de biodiversidade, já que muitas espécies são retiradas sem controle, além do aumento de clareiras e a abertura de estradas sem planejamento, o que fragmenta o ecossistema. Esses impactos reduzem o estoque de carbono da floresta, contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas. Em resumo, tais práticas resultam em degradação florestal severa(INPE, 2022).

A degradação ambiental gera efeitos secundários, uma floresta degradada é caracterizada pela incapacidade de realizar suas funções fundamentais, tais como regular o clima, o ciclo da água e o ciclo de nutrientes. A remoção seletiva de árvores de valor comercial e a ocorrência de queimadas deliberadas são fatores que contribuem para degradação florestal (ALISSON, 2014; MORAES, 2010).

Em um segundo momento esse dano pode ser tido como o desmatamento propriamente dito, que por vez também terá consequências, tais como perda de produtividade, mudança no regime hidrológicos, aumento na emissão de gases de efeito estufa, danos às comunidades indígenas e tradicionais (FEARNSIDE, 2022).

Segundo dados do Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira (SI MEX), da IMAZON, entre agosto de 2020 a julho de 2021, de toda a madeira extraída na Amazônia 38% ocorreram de maneira ilegal, já entre agosto de 2021 a julho de 2022, esse valor foi de 27%, sendo que o estado que se destaca mais na extração ilegal de madeira é o Mato Grosso (IMAZON, 2022;2023).

Para o comércio e transporte de madeira, é necessário apresentar o Documento de Origem Florestal (DOF) que se caracteriza como uma autorização para o transporte e armazenamento de produtos de origem nativa como a madeira.

Esse documento atua como um instrumento de controle da movimentação da madeira, porém o modelo apresenta lacunas que podem comprometer sua eficácia devido as brechas existentes nas regulamentações e pelas dificuldades de ser realizado um rastreamento eficiente devido à extensa área da região Amazônica e o alto número de documentos que devem ser apresentados nas diversas etapas de desdobro da madeira, facilitando a ocorrência de fraudes (ANDRADE,2018).

Dessa forma, faz-se necessário que novos mecanismos de controle e fiscalização sejam implementados para que os impactos causados pela exploração ilegal de madeira diminuam, e que a Amazônia seja preservada e seus serviços ecossistêmicos mantidos, de maneira a garantir a sustentabilidade ambiental, a proteção da biodiversidade e o bem-estar das comunidades que dependem da floresta para sua sobrevivência.

A utilização de isótopos estáveis para o controle e rastreabilidade de madeira surge como uma alternativa, já que a composição química da madeira não pode ser alterada. Por meio da análise das variações isotópicas em elementos como carbono e oxigênio, é possível correlacionar essas assinaturas químicas com condições ambientais específicas da floresta (COSTA et al, 2019).

Isso auxilia no combate à exploração ilegal de madeira, garantindo a rastreabilidade do produto e a proteção das áreas de floresta, podendo complementar outras estratégias de monitoramento e controle ambiental.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

- Verificar a partir de uma amostra de madeira coletada em um armazém de retaguarda pelo IBAMA, a região de origem da árvore usando a metodologia isotópica e comparar essa informação com a declarada no DOF (documento de origem florestal).

### **2.2 Objetivo Específico**

- Comparar os valores isotópicos obtidos em análises realizadas pelos laboratórios CENA-USP e CIE-UNESP a fim de avaliar similaridades e discrepâncias.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Desmatamento da Floresta Amazônica**

A Amazônia é uma floresta tropical, sendo ela a maior floresta tropical remanescente do planeta, tendo 5,4 milhões de km<sup>2</sup>. Aproximadamente 80% ainda estão preservadas, sendo que 60% estão no território brasileiro, localizadas nos estados do Amazonas, Roraima, Amapá, Rondônia, Acre, e parte do Tocantins, Mato Grosso, e Maranhão, que, juntos, compõem a Amazônia Legal (CAMARA, 2019; FERIGATO et al, 2021)

Devido a sua enorme biodiversidade, área verde e disponibilidade de água doce a floresta amazônica possui um papel de destaque em relação às questões climáticas do país e no mundo. A sua oferta de recursos naturais é grande e seus serviços ecossistêmicos diversos.

No Brasil, as florestas tropicais cobrem cerca de 60% do território e desempenham papéis vitais na manutenção da biodiversidade, nos padrões climáticos e hidrológicos regionais, transporte de umidade, armazenamento de carbono, oferecendo uma riqueza de bens e serviços à sociedade (MARGULIS, 2003; TORRENT et al., 2018; FEARNSSIDE, 1989).

O desmatamento, refere-se à conversão de áreas de fisionomia florestal primária por ações antropogênicas. Esse processo pode ser entendido como uma

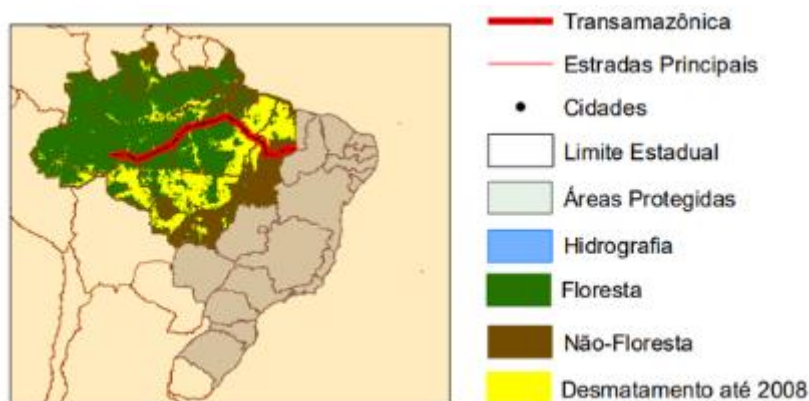


sequência que começa com a floresta intacta e termina com sua conversão em outras coberturas, como áreas agrícolas, pastagens ou urbanas (ALMEIDA et al, ,2021)

Embora seja comum identificar os extremos desse processo, como o corte raso, que remove a cobertura florestal em curto período, o desmatamento inclui também a degradação progressiva da floresta. Essa degradação ocorre de forma mais lenta, sendo difícil de detectar por imagens de satélite, e pode ser causada pela exploração madeireira contínua e por incêndios florestais sucessivos (ALMEIDA et al, ,2021)

A figura abaixo ilustra a Rodovia Transamazônica, destacada em vermelho, representando um marco significativo no processo de exploração da Amazônia.

**Figura 1:** Rodovia Transamazônica



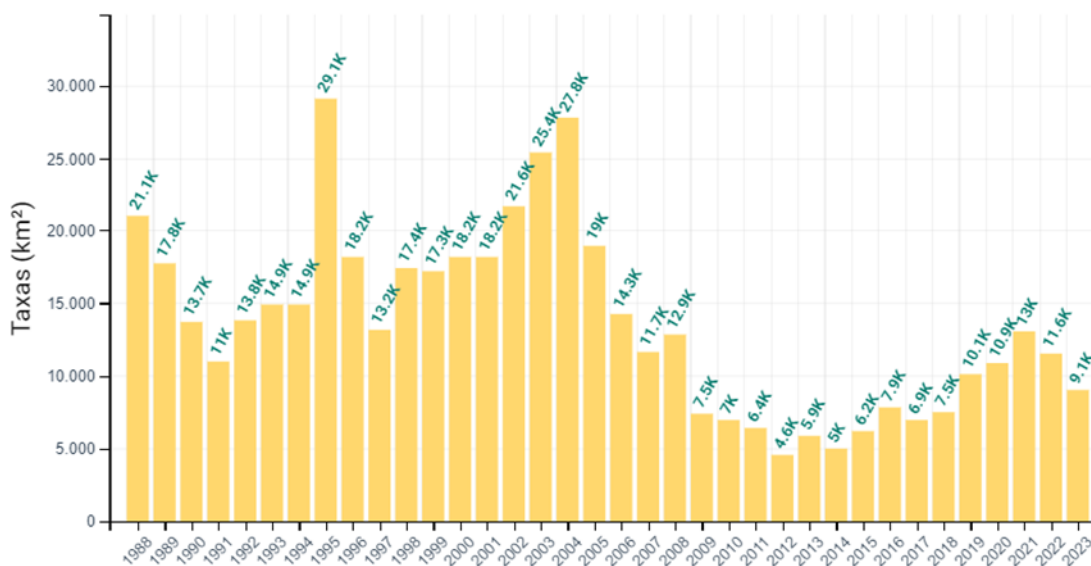
**Fonte:** IPAM, 2010.

O desmatamento da floresta amazônica se deu em 1970, após a construção da rodovia Transamazônica. O processo de desmatamento se deu apresentando momentos de diminuição e aumento em seus valores, essa oscilação na quantidade de desmatamento tem uma ligação intrínseca com questões econômicas e políticas desenvolvidas pelos governos em questão (FEARNSIDE, 2022; FERIGATO et al, 2021).

Apesar de parte da floresta amazônica se manter intacta, a quantidade desmatada é grande, em especial no “arco do desmatamento” entre a borda sul e leste. O desmatamento se iniciou através do incentivo de governos militares, sob a justificativa de uma suposta ameaça de internacionalização da Amazônia, a ocupação da região foi promovida de forma intensa. Esse processo foi realizado principalmente

por migrantes vindos do Sul e Sudeste do Brasil, atraídos pela promessa de novas terras e oportunidades, o que acelerou a exploração e degradação ambiental na floresta (LEMOS, 2011; FEARNSSIDE, 2022).

**Figura 2** – Taxas de desmatamento na Amazônia Legal – 1988 -2023



**Fonte** –Terrabrazilis, 2024

Essa ocupação inicial se deu devido a incentivos fiscais que duraram até 1991, antes do Plano Real. Em 1994 a terra era muito valorizada e os preços eram altos, a recessão econômica vivida no país pode ser a explicação para a queda nos índices de desmatamento até 1991, pois o governo não tinha dinheiro para a construção de rodovias com isso as áreas desmatadas levavam mais tempo para a expansão (FEARNSSIDE, 2022).

O aumento do desmatamento está quase sempre ligado à construção de estradas que possibilita acesso ao interior da floresta e o transporte de mercadorias. As estradas para retirada de madeira, em especial de mogno, são precursoras de rodovias, tornando assim lucrativo o comércio de madeira em plantações de soja e fazendas de criação de gados (FEARNSSIDE, 2022).

Em 2004, foi lançado o Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), que tem como objetivo reduzir de forma contínua o desmatamento e criar condições de transição para um modelo de desenvolvimento sustentável na Amazônia Legal (MMA, 2023).

O PPCDAm foi responsável pela diminuição de 83% do desmatamento até 2012, segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Tais valores de desmatamento foram mantidos abaixo de 8mil km<sup>2</sup> até 2018. Com o desmonte sofrido em 2019 nos órgãos ambientais federais devido ao governo Bolsonaro, o desmatamento chegou a 13mil km<sup>2</sup> em 2021, valor que não acontecia desde 2006. Após o presidente Lula assumir o governo em 2022 e retomar as atividades do PPCDAm os valores de desmatamento apresentaram uma diminuição, conforme a Figura 1 (MMA, 2023).

O plano define o compromisso de atingir o desmatamento zero até 2030, sendo organizado em quatro eixos principais: atividades produtivas sustentáveis; monitoramento e controle ambiental; ordenamento fundiário e territorial; e a implementação de instrumentos normativos e econômicos voltados para a redução do desmatamento e a efetivação das ações previstas nos outros eixos (MMA,2023).

As causas do desmatamento são várias tendo destaque principalmente a criação de gado (FEARNISIDE, 2022) e as demais causas estão atreladas à criação de rodovias, atividades de setores econômicos tais como agropecuária, industrial e serviços, queimadas, falta de controle e fiscalização, exploração ilegal de madeira, pouca presença de poder público federal, a ocupação e o uso dos recursos naturais; o conflito entre a legislação ambiental e a política fundiária dentre outros (LEMOS, 2011; FERIGATO et al,2021; FERRO,2021; FEARNISIDE, 2022).

Diversos impactos podem ser descritos decorrente do desmatamento da floresta amazônica que são a perda de produtividade, mudanças no regime hidrológico, perda de biodiversidade, emissões de gases de efeito estufa, mudanças física, químicas e biológicas reduzindo a qualidade do solo, desertificação, além de danos às comunidades tradicionais e indígenas (FEARNISIDE, 2022; Lopes et al 2023).

### **3.2 Exploração Madeireira**

A exploração madeireira legal é uma atividade fundamental para suprir a demanda global por madeira e produtos derivados, desempenhando um papel crucial na economia e no fornecimento de materiais essenciais para diversas indústrias. No

entanto, esse processo não ocorre sem custos significativos para o meio ambiente, sociedade e economia. (LUEMBA, 2021)

A atividade de exploração madeireira realizada de acordo com as regulamentações e normas legais estabelecidas pelo Estado brasileiro não deve ser confundida com desmatamento.

Embora essas áreas nunca tenham sido completamente desmatadas (corte raso), sofreram diversos distúrbios, como secas, incêndios, exploração madeireira e efeito de borda devido à fragmentação florestal. Esses distúrbios resultam na perda de estoque de carbono e biodiversidade. No entanto, com um manejo adequado ao longo de 20 a 30 anos, é possível que essas florestas se regenerem e até mesmo recuperem algumas de suas características originais. (ANDRADE,2021; ALISSON, 2014).

Em 1994, o Decreto nº 1282 marcou um ponto crucial ao definir, pela primeira vez em termos legais, o conceito de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira. Foram estabelecidos os princípios e diretrizes para uma exploração madeireira ambientalmente responsável na região, as práticas ideais de extração devem ser integradas às melhores práticas de manejo para assegurar a sustentabilidade da produção. (LERER,2005; CARVALHEIRO,2008; HOLMES 2004)

Segundo a Lei nº 12.651/2012, um imóvel rural situado na região da Floresta Amazônica Legal possui autorização para desmatar 20% de sua área para uso alternativo do solo. Os 80% restantes da área são intitulados como reserva legal, e sua exploração só é permitida a partir de um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS).

O Sistema de Gestão Florestal é completo por entidade e documentações diferentes que desempenham funções específicas durante o processo de exploração madeireira, abaixo segue um esquema que visa apresentar quais as principais entidades e documentos que regulam esses sistema, assim como suas funções.

**Figura 3:** Sistema de Gestão Florestal

**Fonte:** Elaboração dos autores

O Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (SINAFLOR) é uma ferramenta que monitora a origem de produtos e subprodutos florestais, como madeira e carvão. O SINAFLOR é de uso obrigatório para a emissão de autorizações de remoção vegetal, foi instituído pela Instrução Normativa nº 21, de 24 de dezembro de 2014, em observância dos arts. 35 e 36 da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (IBAMA,2024)

O Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) consiste em uma prática que envolve um planejamento cuidadoso para minimizar os impactos ambientais e maximizar o uso econômico sustentável da floresta. (ANDRADE, 2021; CAMARA, 2019; MOREIRA,2021; FEARNSSIDE,2022)

Uma das características do manejo florestal sustentável é implementar sistemas silviculturais e técnicas voltadas para a produção de madeira, ao mesmo tempo em que se promove a regeneração natural da floresta, garantindo sua preservação, retirando apenas a quantidade necessária para as necessidades humanas. Seguindo as normas técnicas e legais, possibilita o aproveitamento econômico da floresta e a manutenção de seus serviços ecossistêmicos (LEMOS 2011. P.106; NARDOTO et al.,2022).

O PMFS foi estabelecido pela Resolução CONAMA nº 406 de 02 de fevereiro de 2009, são fornecidas diretrizes técnicas que orientam a execução do manejo florestal sustentável, em conformidade com a legislação que regulamenta a atividade florestal na Amazônia brasileira (ANDRADE 2021; CAMARA, 2019; MOREIRA,2021).

A floresta é subdividida em Unidades de Produção Anual (UPAs), cada uma delas sujeita à exploração ao longo de doze meses, mediante a obtenção de Autorização de Exploração (Autex). Esta autorização é indispensável para aqueles

que buscam produzir e armazenar madeira, pois ela define o volume máximo por espécie que poderá ser explorado.

A exploração de madeira realizada dentro dos parâmetros legais pode trazer benefícios significativos quando conduzida por meio de um manejo sustentável. Seguir rigorosamente todas as etapas e princípios desse manejo visa reduzir o impacto sobre o ecossistema, promovendo práticas menos agressivas.

No entanto, é crucial distinguir essas técnicas de exploração legais em relação às ilegais, que frequentemente resultam em desmatamento e degradação florestal, contrariando a legislação e causando danos que podem se tornar irreparáveis a determinadas áreas da floresta.

Anualmente, é exigida a aprovação do Plano Operacional Anual (POA), no qual são definidas as atividades a serem realizadas, a duração das mesmas, com um limite máximo de doze meses, e a localidade em que ocorrerão (MOREIRA, 2011).

### 3.3 Monitoramento da Exploração Madeireira na Amazônia

O SIMEX por meio da IMAZOM realiza estudos nos quais são feitos o mapeamento e a avaliação da legalidade da exploração madeireira na Amazônia brasileira. No período entre agosto de 2020 e julho de 2021, foram identificados 377.624 hectares de exploração de madeira, e no período entre agosto de 2021 e julho de 2022, foram explorados 394.617 hectares de florestas nativas para fins madeireiros na Amazônia, alguns dados dispostos nesses estudos seguem abaixo nas figuras.

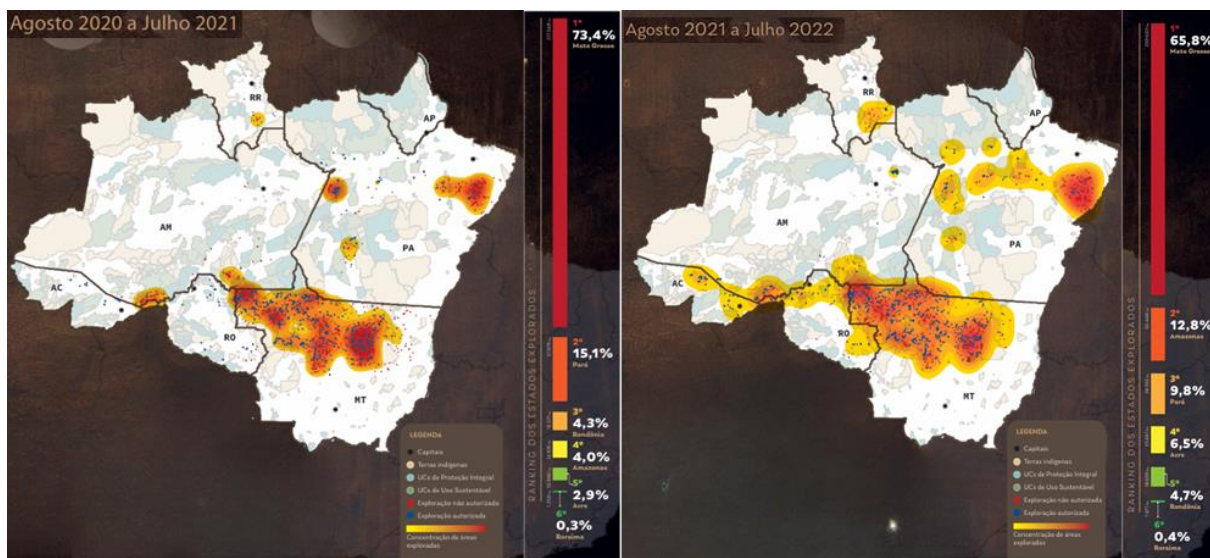
**Figura 4** – 10 Municípios com mais exploração não autorizada, Agosto de 2020 e Julho de 2021, Retirado do site do SIMEX.



Fonte: IMAZON



**Figura 5 –** Mapeamento da exploração madeireira na Amazônia, Agosto de 2020 e Julho de 2022, SIMEX



Fonte: IMAZON

Entre agosto de 2020 e julho de 2021, o Mato Grosso é o estado que mais tem área explorada, sendo responsável por 73,4% das áreas totais, dentro os 10 municípios com mais exploração não autorizada, 8 são referentes ao Mato Grosso. Entre agosto de 2021 e julho de 2022, o Mato Grosso continua sendo o estado que mais tem área explorada, sendo responsável por 65,8% das áreas totais, dentro os 10 municípios com mais exploração não autorizada, 9 são referentes ao Mato Grosso.

O Mato Grosso recebe um lugar de destaque em todos os quesitos nos dois anos seguidos como o estado que mais explora madeira e o que mais explora em áreas não autorizadas. Entre agosto de 2020 e julho de 2021, percebemos uma maior concentração de áreas exploradas em Mato Grosso, e já de agosto de 2021 e julho de 2022, essa concentração começa a se dissipar por outros estados, onde o Amazonas e o Acre começam a ter áreas exploradas, e havendo uma dissipação/aumento de áreas exploradas no Pará e em Roraima.

A figura abaixo apresenta a área desmatada na Amazônia Legal de acordo com dois parâmetros principais: por estados e por classes de uso do solo. Os dados são provenientes do sistema DETER (Detecção de Desmatamento em Tempo Real) da

plataforma Terrabrasilis, referentes ao período de 13 de setembro de 2023 a 13 de setembro de 2024.

**Figura 6-** Distribuição de Áreas Desmatadas na Amazônia Legal por Estados e Classes de Uso do Solo



**Fonte:** Sistema DETER, Terrabrasilis - INPE

No gráfico à esquerda, que mostra a área por estados, destaca-se o Pará (PA), com uma área desmatada de 1707,16 km<sup>2</sup>, seguido por Mato Grosso (MT) com 2333,50 km<sup>2</sup>. Esses estados concentram grande parte das atividades de desmatamento e exploração madeireira na região.

No gráfico à direita, referente às classes de uso do solo, são destacadas duas categorias de corte seletivo: o **Corte Seletivo Tipo 2 (Geométrico)** e o **Corte Seletivo Tipo 1 (Desordenado)**. O corte seletivo geométrico indica áreas sob planos de manejo florestal sustentável (PMFS), o que sugere uma exploração regulamentada e controlada. Já o corte seletivo desordenado, por outro lado, é um forte indício de exploração ilegal de madeira. Esses dados fornecem informações cruciais sobre a dinâmica de desmatamento e as formas de exploração madeireira na Amazônia Legal, revelando a complexidade da gestão e monitoramento dessas atividades na região.

### 3.4 Manejo Florestal na Amazônia Brasileira: Legalidade versus Ilegalidade

A exploração de madeira na Amazônia é acompanhada por um padrão complexo de desenvolvimento de infraestrutura, especialmente estradas, que facilitam não apenas a remoção de madeira, mas também o acesso a novas áreas para investimentos agrícolas, como plantações de soja e fazendas de gado. Esse processo não apenas degrada a floresta, mas também aumenta sua inflamabilidade,



contribuindo para a ocorrência de incêndios florestais. (FEARNSIDE, 2022; LUEMBA,2021)

O ciclo resultante de degradação, incêndios e destruição total da floresta pode começar como uma atividade não detectada, mas se torna visível em imagens de satélite posteriormente. Esse ciclo vicioso destaca a interconexão entre a exploração ilegal de madeira e o desmatamento. (LUEMBA,2021)

A implementação das regulamentações do manejo florestal, aliada à intensa pressão para reduzir as taxas de desmatamento na Amazônia, trouxe consigo uma necessária regularização das atividades madeireiras. (CARVALHEIRO,2008; WALDHOFF,2019)

Contudo, o baixo custo de extração aliada ao alto preço da madeira nativa serrada, deu origem a uma indústria clandestina de extração de madeira. (WALDHOFF,2019; NARDOTO et al.,2022)

Os extratores clandestinos buscam reduzir os custos de extração em comparação com as práticas do manejo florestal sustentável. Em termos de capital físico, eles têm uma maior capacidade de investimento em bens e materiais de trabalho. No entanto, sua atividade não visa a conservação das espécies exploradas, ao contrário das extrações legais. (WALDHOFF,2019; CARVALHEIRO,2008)

A falta de controle sobre os recursos florestais é uma característica marcante da extração clandestina. Enquanto as extrações legais são submetidas a rigorosos processos de controle de acesso, incluindo mapeamento, demarcação de áreas e identificação de árvores a serem exploradas, as atividades clandestinas operam à margem dessas regulamentações. (ADEODATO, 2011; CRIVELLI, 2017; WALDHOFF,2019)

No que diz respeito à conservação da floresta, as áreas exploradas legalmente são cadastradas junto ao órgão ambiental competente e protegidas contra conversão para outros usos. Por outro lado, as áreas onde ocorre extração clandestina não possuem garantias formais ou informais de preservação. (ADEODATO,2011; CRIVELLI, 2017; WALDHOFF,2019)

Os extratores clandestinos desfrutam de uma maior independência financeira, pois requerem menos recursos para operar e estão livres dos custos associados aos trâmites legais do manejo florestal sustentável. Isso lhes permite transformar os recursos naturais em ativos financeiros de forma mais rápida, em contraste com as

burocracias enfrentadas pelas extrações legais. (ADEODATO,2011; WALDHOFF,2019)

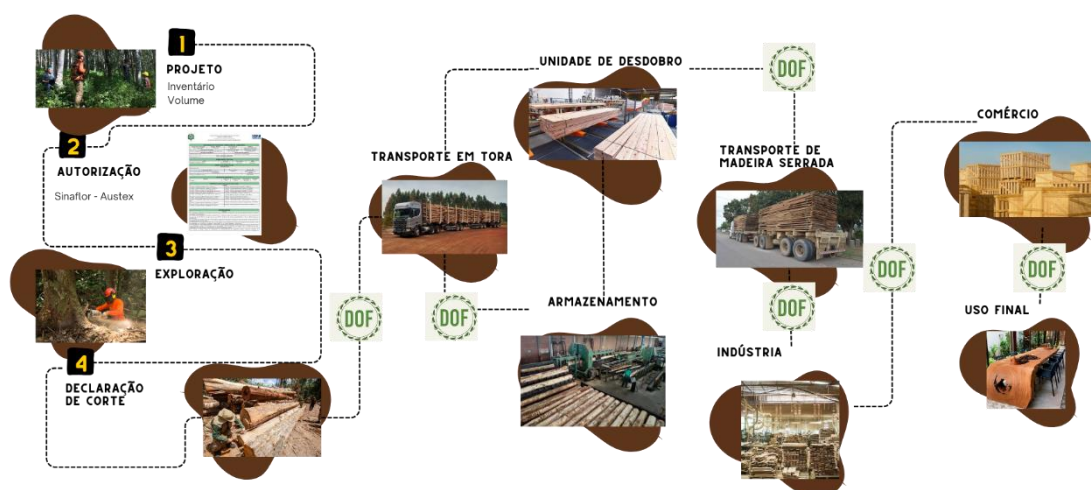
Operando completamente na informalidade, os extratores clandestinos contornam a necessidade de documentos fiscais e licenças ambientais. Suas transações ocorrem diretamente com atravessadores ou consumidores finais, sem burocracia, mas com consequências ambientais e fiscais significativas. (ADEODATO,2011; CRIVELLI 2017; WALDHOFF,2019)

### 3.5 Documento de Origem Florestal (DOF): Histórico e regulamentação

O Documento de Origem Florestal (DOF) consiste em uma licença obrigatória para o transporte e armazenamento de produtos de origem nativa, incluindo o carvão vegetal nativo. Este documento é essencial para controlar e monitorar a origem, transporte e comercialização de produtos florestais, combater o desmatamento ilegal, promover transparência e rastreabilidade, e facilitar a fiscalização ambiental no Brasil.

Abaixo segue um fluxograma com as etapas presentes no processo de exploração madeireira de maneira a mostrar momentos nos quais o saldo do DOF deve ser atualizado, para que seja realizado o monitoramento dessa cadeia de exploração.

**Figura 7:** Análise do Esquema DOF para Controle da Exploração Madeireira no Brasil



**Fonte:** Elaboração dos autores

O fluxograma apresenta etapas do processo de exploração madeireira que vai desde de a origem começando pelo projeto no qual é realizado o inventário e geolocalização do local onde será pretendido fazer a extrações.

Seguindo pelo momento de autorização, e a exploração propriamente dita, até os momentos nos quais a madeira passa pelo corte, transporte, armazenamento, beneficiamento até chegar no comércio e o uso final, destacando o papel do DOF durante essas etapas.

O DOF foi estabelecido pela Portaria nº 253 de 18 de agosto de 2006 do Ministério do Meio Ambiente (MMA), este consiste em um certificado digital ou licença vital para empresas que movimentam, transportam, recebem e armazenam produtos florestais nativos. Esta autorização é imprescindível devido às informações sobre a procedência desses produtos, conforme exigido pela Lei de Crimes Ambientais nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, e pelo artigo 36 da Lei de Proteção da Vegetação Nativa nº 12.651 de 2012. (FEARNSIDE, 2022; ANDRADE,2018; IBAMA,2024)

A emissão do documento de transporte e outras operações são conduzidas de maneira eletrônica através do sistema DOF, disponibilizado online pelo Ibama. Este serviço é oferecido sem custo aos setores produtivos e empresariais relacionados à base florestal, que são os usuários finais do sistema, bem como aos órgãos ambientais participantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), os quais atuam como gestores no âmbito da descentralização da gestão florestal, conforme previsto na Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. (IBAMA,2024; ANDRADE 2018)

Desde 5 de dezembro de 2022, está em vigor o Sistema DOF+ Rastreabilidade que moderniza a emissão, gestão e monitoramento do Documento de Origem Florestal (DOF). Desenvolvido para aprimorar o sistema anterior (DOF Legado, de 2006), o DOF+ introduz um código de rastreamento, vinculado a Autorização de Exploração (AUTEX) originado do Sistema Nacional de Controle da Origem dos Produtos Florestais (SINAFLO) e sistemas estaduais, que acompanha o produto desde a origem até o destino (IBAMA,2024).

Os produtos florestais que estão sujeitos ao controle e, portanto, exigem a emissão do DOF para seu transporte são divididos em dois grupos, Produto florestal bruto e Produto florestal processado. Suas especificidades estão listadas na tabela abaixo.

Tabela 1 – Tipos produtos florestais

Produto florestal bruto	Produto florestal processado
A) <u>Madeira em tora.</u>	A) Madeira serrada devidamente classificada.
B) Torete.	B) Piso, forro (lambрил) e porta lisa feitos de madeira maciça.
C) poste não imunizado.	C) Rodapé, portal ou batente, alisar, tacos e decking.
D) Escoramento.	D) Lâmina torneada e lâmina faqueada.
E) Estaca e mourão..	E) Madeira serrada curta classificada obtida por meio do aproveitamento de resíduos provenientes do processamento de peças de madeira.
F) Acha e casca nas fases de extração/fornecimento.	F) Resíduos da indústria madeireira para fins energéticos ou para fins de aproveitamento industrial, exceto serragem.
G) Lenha.	G) Dormentes.
H) Palmito.	H) Carvão de resíduos da indústria madeireira.
I) Xaxim.	I) Carvão vegetal nativo, inclusive o empacotado na fase de saída do local da exploração florestal e/ou produção.
	J) Artefatos de xaxim na fase de saída da indústria.
	K) Cavacos em geral.
	L) Bolacha de madeira.

Fonte: IBAMA 2024.

Para uma pessoa física ou jurídica que necessite de acesso ao DOF é necessário o cumprimento dos seguintes requisitos.

- 1- Estar inscrito no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e/ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF/APP) e ter declarado pelo menos uma atividade pertinente ao DOF
- 2- Estar em situação regular junto ao Ibama, verificada por meio da emissão de Certificado de Regularidade
- 3- Possuir Certificado Digital do tipo A3

Para emissão da guia de transporte devem ser informados os dados presentes na tabela abaixo.

**Tabela 2 – Dados para emissão do DOF**

Dados do remetente	Dados do destinatário
Emissor	Destinatário
Ibama / CTF	Ibama / CTF
Endereço	Endereço
Bairro	Cidade
Município	País
Origem (pátio)	Destino (Pátio)
Coordenadas	Coordenadas
Endereço	Endereço
Bairro	Bairro
Município	Município
Roteiro de acesso	Roteiro de acesso
Autorização	Meio de transporte
Tipo de autorização	Placa/registro
Produto/espécie	Município origem
Quantidade	Município destino
Unidade	Número do documento fiscal
Valor	Validade, código de controle e fiscalização do Ibama

Fonte: Luemba, 2021.

Além dos dados requeridos para a emissão da guia de transporte, o usuário também deve inserir no Sistema DOF todas as etapas de processamento dos produtos florestais e sua destinação final. Esta última engloba sua utilização na construção civil, na geração de energia térmica, como componente na fabricação de móveis, vendas no varejo e demais destinos que representem um uso final inalterável ou a conversão em produtos isentos de controle florestal (produtos acabados) (FREIRE, 2014).

O Sistema DOF é essencialmente contábil, baseado em créditos de produtos florestais que se originam nas autorizações de exploração florestal concedidas pelos órgãos ambientais competentes. Os volumes autorizados são creditados em nome do detentor da área explorada, e o registro das operações de transformações, deslocamentos e consumo dos produtos florestais é obrigatório para manter os saldos atualizados no sistema (FREIRE, 2014; LUEMBA, 2021).

A madeira vai sendo transformada ao longo da cadeia produtiva, e a cada transformação há um coeficiente de aproveitamento. Por exemplo, a madeira em tora

tem um volume inicial, mas quando é desdobrada em tábuas, ocorre uma perda de volume.

Assim, o volume aprovado para a tora diminui e é recalculado para o novo formato. Esse processo se repete a cada transformação, até chegar ao produto final. Os destinos dos produtos podem ser tanto o mercado interno quanto o externo, e cada tipo de destino possui um DOF específico. Basicamente, o DOF é um documento que se transforma ao longo da cadeia, com cada novo documento tendo origem no anterior.

Todos os transportes de produtos madeireiros nativos devem ser acompanhados do DOF e da Nota Fiscal para o destino. O IBAMA oferece duas formas de solicitar créditos de volume: através do Formulário de Solicitação de Autorização Florestal no Sistema DOF, para quem possui o Cadastro Técnico Federal (CTF), ou através de contrato de compra com uma companhia reconhecida, com informações do produto, volume e autorização florestal anexadas (FREIRE, 2014; LUEMBA,2021).

O Sistema DOF atribui aos usuários a responsabilidade de manter o registro preciso dos estoques e movimentos dos produtos florestais. Além de viabilizar auditorias e oferecer dados estatísticos, ele desempenha como um integrador dos sistemas estaduais de controle florestal. Unidades federativas como Mato Grosso, Pará e Minas Gerais mantêm sistemas próprios, alinhados com o sistema federal (FREIRE, 2014).

Quaisquer alterações nas informações da unidade de transporte podem ser solicitadas através do site do IBAMA, enquanto o armazenamento de madeira exige aprovação do órgão ambiental responsável (LUEMBA,2021).

### **3.6 Falhas Sistema DOF**

Embora o sistema DOF seja bem planejado, existem produtores que burlam todo o sistema visando comercializar tipos de madeiras e quantidades diferentes das autorizadas pelo governo.

Existem produções que se dizem sustentáveis, mas mantêm apenas um “disfarce”. São casos em que o Plano de Manejo Florestal Sustentável não respeita os critérios técnicos e legais e são utilizados de forma ilícita, como por exemplo, para

“esquentar” madeira extraída ilegalmente de outras áreas, como unidades de conservação e terras indígenas.

Nessas situações, a madeira nativa ilegal é comercializada por meio de DOF amparados pelas AUTEX que são a origem dos créditos aprovados pelos órgãos ambientais competentes

Outra falha presente na emissão do DOF é o fato de que os documentos são emitidos em momentos diferentes do processo de beneficiamento da madeira, o que dificulta a rastreabilidade.

Primeiro é emitido um DOF para transporte de madeira de origem (áreas rural) para as serrarias onde a ocorrerá o desdobro da madeira, depois há emissão de DOF para o transporte da madeira processada (produto do desdobro) para intermediários ou para o consumidor final.

Dessa forma, apesar de o sistema DOF ser uma ferramenta fundamental para o controle e rastreamento de produtos florestais, ele ainda apresenta vulnerabilidades que permitem ser burlado. Mesmo com uma estrutura bem definida, o sistema DOF requer aprimoramentos e uma fiscalização mais rigorosa para garantir a legalidade e a sustentabilidade na cadeia produtiva da madeira.

### **3.7 Métodos para rastreabilidade de madeira**

A madeira é um material heterogêneo composto por celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e água. A análise isotópica da madeira é utilizada como ferramenta para compreender os processos fisiológicos das árvores e investigar variações climáticas e aspectos ambientais. Através desses isótopos, é possível reconstruir climas passados, entender variações climáticas e fisiológicas, explorar os ciclos biogeoquímicos de uma área específica, além de permitir identificar a origem de espécies florestais.

O problema da rastreabilidade da madeira tem sido alvo de estudos e pesquisas há algum tempo. A Global Timber Tracking Network (GNTT) é uma organização internacional que promove a operacionalização de ferramentas inovadoras para identificação de espécies e determinação da origem geográfica da madeira.

Diferentes técnicas têm sido utilizadas pelos cientistas, tanto para a identificação quanto para determinar a origem geográfica de madeira, a depender da técnica utilizada a amostra de madeira pode ser minúscula tais como (folheado de alguns milímetros de espessura ou uma lasca cortada de uma peça de arte), pequena (por exemplo, alguns centímetros cúbicos cortados de uma peça de mobiliário) ou seu tamanho real (métodos não destrutivos). Além do tamanho da amostra necessária para a análise, cada técnica tem suas vantagens e limitações.

As técnicas utilizadas são diversas, muitas delas são inovadoras e estão em desenvolvimento, já outras como a anatomia é uma técnica antiga e está bem estabelecida. Um dos grandes desafios para a rastreabilidade é gerar um banco de dados de referência contendo as espécies de maior interesse, para auxiliarem em análises posteriores.

As técnicas utilizadas atualmente sugeridas pelo GNTT são baseadas na estrutura/anatomia da madeira, biologia molecular da madeira e composição química, cada técnica possui limitações e vantagens e podem ser conferidas no quadro abaixo, com base no GNTT.

**Quadro 1** – Técnicas de Análise para Madeira, GNTT

<b>Técnica</b>	<b>Método</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
<b>Anatomia</b>	A estrutura da madeira é usada para identificar o gênero e espécie, incluindo características macroscópicas visíveis a olho nu, como cor, porosidade e padrões de cores.	Identificação da madeira pela anatomia é um método antigo com amplo banco de dados global de amostras para diversas espécies.	Alguns tipos de madeira são semelhantes em anatomia, dificultando a identificação da espécie, mas permitindo distinguir o gênero. A anatomia da madeira varia com o ambiente, mas não revela a origem geográfica.



<b>Genética</b>	<p>O DNA genético é extraído das células da madeira através de pulverização e isolamento com produtos químicos. Partes específicas do DNA são comparadas com dados de referência para identificar a espécie ou origem geográfica da amostra de madeira.</p>	<p>Mesmo as amostras de madeira mais anatomicamente semelhantes podem ser identificadas até o nível de espécie. Além de informações sobre a origem taxonômica, o DNA também contém informações sobre a origem geográfica da madeira.</p>	<p>É um método novo, é necessário expandir a sua base de dados. As células das partes mais externas estão mortas, o que significa DNA degradado. O processamento da madeira dificulta a extração do DNA.</p>
<b>Espectrometria de Massas</b>	<p>Os produtos químicos dentro e sobre a superfície da madeira podem ser volatilizados pela aplicação de uma corrente de íons de hélio aquecidos a 350°C. Estes são então ionizados num espectrómetro de massa para gerar um perfil químico</p>	<p>Este método quase não requer preparação de amostra, é não destrutivo (uma lasca de madeira é suficiente) e rápido. Espécies estreitamente relacionadas podem ser diferenciadas e, para alguns táxons, a origem geográfica também pode ser distinguida.</p>	<p>Uma coleção de referência limitada está disponível até o momento, mas a coleção de referência está em constante expansão. Além disso, embora a maioria dos perfis fitoquímicos sejam específicos da espécie, nem todos o são.</p>
<b>Espectroscopia no infravermelho próximo</b>	<p>Os espectros de absorção da madeira são medidos quando exposta à energia eletromagnética do infravermelho</p>	<p>Este método quase não requer preparação de amostra, é não destrutivo e rápido. Espécies intimamente relacionadas podem ser diferenciadas e a técnica tem a capacidade de</p>	<p>Os dados de referência do NIRS ainda são limitados. Como método independente, a precisão da identificação é variável.</p>

	próximo. Eles fornecem informações sobre a estrutura química e física da madeira.	discriminar entre proveniências geográficas	
<b>Isótopos estáveis</b>	Quando uma árvore cresce e absorve água, nutrientes e dióxido de carbono, estas proporções isotópicas estáveis são transmitidas à madeira, imprimindo-lhe um marcador geográfico que pode ser usado para identificar a origem da madeira.	O método está bem desenvolvido e já é utilizado há anos para determinar a proveniência de produtos alimentares.	A disponibilidade de dados de referência é crucial, como para todos os métodos.

Fonte: Elaborado pelo grupo, baseado no GNTT, 2024.

### 3.8 Isótopos estáveis

Isótopos estáveis são variantes de elementos químicos que possuem o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons em seus núcleos, e não sofrem decaimento radioativo ao longo do tempo. Eles são essenciais em pesquisas científicas, como estudos ecológicos, bioquímicos e ambientais, pois permitem rastrear processos naturais e entender melhor a dinâmica dos ecossistemas (COSTA et al, 2019; FARRAPO,2019; PEREIRA et al, 2007)

O uso de isótopos estáveis para análises forenses começa ainda na década de 1950 nas áreas de geoquímica e paleo-oceanografia, onde os objetivos dos estudos eram a construção de bases teóricas para entender condições climáticas passadas, a partir de 1980 as técnicas já mais evoluídas começam a ser utilizadas para outros fins. (FARRAPO, 2019)

Já o uso de isótopos estáveis aplicados ao estudo da madeira surgiu em 1983, os primeiros estudos foram realizados em árvores de clima temperado, com isso existe

uma maior quantidade de trabalhos para esse tipo de árvores, em 2005 começaram a surgir trabalhos nos trópicos. Por serem análises com custo elevado e trabalhoso, a maior parte dos estudos acontecem em prazos curtos. (FARRAPO, 2019)

A utilização de isótopos estáveis para o rastreamento de madeira pode ser uma ferramenta importante no combate ao ilícito de exploração ilegal, pois as análises isotópicas não podem ser fraudadas, ao contrário dos documentos (DOF, Autex, etc.) que atualmente regulam a exploração madeireira.

A utilização de isótopos baseia-se na comparação das razões isotópicas (R) entre materiais diferentes. Esta razão isotópica (R) é determinada pelo quociente entre o isótopo com mais nêutrons no núcleo atômico, e conseqüentemente mais pesado, e o isótopo com menos nêutrons, e, portanto, mais leve. Para o carbono, R é a razão entre os átomos de  $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$ . Para o nitrogênio, R é uma razão entre  $^{15}\text{N}$  e  $^{14}\text{N}$ , e para o oxigênio, entre  $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$ . (COSTA et al, 2019)

Dada a menor abundância de isótopos mais pesados na natureza, a razão isotópica da amostra é comparada a um padrão pré-determinado, definindo o valor  $\delta$  conforme descrito a seguir

Como geralmente a abundância na natureza de átomos do isótopo mais pesado é muito menor do que a de átomos do isótopo mais leve, R da amostra é comparada à R de um padrão pré-determinado, definindo assim o valor  $\delta$ , onde  $R_{\text{amostra}}$  é a proporção  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$  ou  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$  da amostra e  $R_{\text{padrão}}$  é a proporção entre  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$  ou  $^{18}\text{O}:^{16}\text{O}$  de um padrão internacionalmente reconhecido, como mostrado a seguir:

$$\delta = \left( \frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

Geralmente, os valores de R são muito pequenos, por isso, multiplica-se esses valores por mil, adotando a notação  $\delta$  por mil (‰). Especificamente, a notação mais comum para o carbono é  $\delta^{13}\text{C}$ , para o nitrogênio é  $\delta^{15}\text{N}$  e para o oxigênio é  $\delta^{18}\text{O}$ .

A proporção de  $\delta^{13}\text{C}$  está ligado ao processo de fixação de carbono atmosférico em plantas, que acontecem por meio de duas vias metabólicas durante o processo de fotossíntese, sendo conhecido como metabolismo  $\text{C}_3$  (Ciclo de Calvin) e o

metabolismo C<sub>4</sub> (Hatch-Slack), o metabolismo C<sub>3</sub> é realizado por árvores e arbustos, já o C<sub>4</sub> por gramíneas. (COSTA et al, 2019; FARRAPO, 2019).

A proporção de  $\delta^{18}\text{O}$  está ligado ao efeito chamado de continentalidade, que está relacionado com a circulação atmosférica de água, no qual a água evaporada do oceano se encaminha para o continente gerando as chuvas, a medida em que esse processo acontece ocorre o fracionamento de  $\delta^{18}\text{O}$ , que resulta da precipitação e evaporação. O que gera diferenças nas suas proporções à medida que a chuva se movimenta para o interior do continente, marcando assim a origem geográfica da água da chuva (COSTA et al, 2019).

### 3.9 Isoscapes e Atribuição Isotópica

Isoscapes são mapas que representam a variação isotópica ambiental ao longo de uma região geográfica. Elas refletem processos biogeoquímicos diversos, dependendo da escala e dos materiais analisados. (COSTA et al, 2019)

A atribuição isotópica baseia-se em comparar amostras de origem desconhecida com locais cujas razões isotópicas são compatíveis com a amostra em questão. A forma mais direta de atribuição envolve localizar visualmente, em um isoscape, as áreas que apresentam variação isotópica similar à da amostra desconhecida, de maneira a propor regiões com maior probabilidade de origem. (COSTA et al, 2019)

Modelos estatísticos avançados permitem uma análise mais detalhada, levando em consideração a variação ambiental e biológica, e podem identificar áreas de origem de forma contínua.

Áreas contínuas são chamadas de superfícies probabilísticas, que correspondem a rasters, que são imagens formadas por uma matriz de pontos que representam uma grade retangular de pixels ou células, contendo valores de probabilidade atribuídos a cada pixel. Quando se trabalha com dados contínuos, a isoscape serve como base para estimar a probabilidade de atribuição, empregando funções de distribuição normal.

O valor da razão isotópica da amostra a ser atribuída, juntamente com sua variação (estimada a partir da variância estatística dos valores isotópicos de origem

conhecida), é utilizado para calcular a superfície probabilística de atribuição (COSTA et al, 2019).

Atribuições isotópicas podem ocorrer por similaridade com grupos de amostras ou por comparação direta com localidades conhecidas. No contexto forense, o objetivo é identificar a origem exata das amostras, distinguir entre diferentes regiões de origem ou excluir áreas com baixa probabilidade de ser a fonte (COSTA et al, 2019)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Amostragem

As amostras de madeira para este estudo foram fornecidas por fiscais do IBAMA, que as recolheram no armazém de retaguarda, em Itajaí-SC. A seguir, são apresentadas as imagens das amostras de madeira obtidas.

**Figura 8-** Amostras de madeiras coletadas no armazém de retaguarda, Itajaí-SC.



**Fonte:** Beatriz Alencar (INCT-MRFor)

Os dados referentes às amostras estão separados de acordo com alguns aspectos, tais como: localidade, biológicos, comércio internacional, documentação, esses dados são apresentados nas tabelas abaixo.

**Quadro 2-** Localização declarada no DOF

Nº da Amostra	Origem	UF	Propriedade
1	Apiacás	MT	1
2	Apiacás	MT	1
3	Apiacás	MT	1
4	Altamira	PA	2
5	Altamira	PA	2
6	Altamira	PA	2
7	Colniza	MT	3
8	Machadinho do Oeste	RO	4
9	Machadinho do Oeste	RO	4

Fonte: Elaborado pelos autores

**Quadro 3-** Características biológicas das amostras

Nº da Amostra	Espécie declarada	Gênero/espécie e identificada	Nome Popular	Família
1	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
2	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
3	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
4	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
5	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
6	Tabebuia serratifolia	<i>Handroanthus sp.</i>	Ipê	Bignoniaceae
7	Dipteryx odorata	<i>Dipteryx sp.</i>	Cumarú	Fabaceae
8	Dipteryx odorata	<i>Dipteryx sp.</i>	Cumarú	Fabaceae
9	Dipteryx odorata	<i>Dipteryx sp.</i>	Cumarú	Fabaceae

Fonte: Elaborado pelos autores

Dentre as nove amostras, quatro são declaradas como sendo do Mato Grosso, três do Pará e duas de Rondônia. De acordo com o DOF, seis amostras são de Ipê e duas de Cumarú, a tabela mostra na segunda coluna as espécies que foram declaradas do DOF, e na terceira coluna as espécies que foram identificadas pelo IBAMA, por um especialista.

## 4.2 Análises Isotópicas

As amostras de madeira passaram por três análises isotópicas distintas, sendo uma delas realizada em madeira bruta pelo CENA/USP, e as outras duas análises pelo CIE/UNESP sendo de madeira bruta e após a extração de celulose.

As amostras de madeira bruta (sem a retirada dos extrativos vegetais) foram analisadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/Universidade de São Paulo), Piracicaba, SP, Brasil.

As amostras foram encapsuladas em cápsulas de estanho contendo 3 mg de amostra já seca e moída a fino pó. As razões de isótopos de carbono foram determinadas por combustão usando um analisador elementar (Carlo Erba, CHN-1100) acoplado a um espectrômetro de massa Thermo Finnigan Delta Plus.

As razões isotópicas são relatadas em partes por mil (‰), onde  $\delta^{13}\text{C}$  é relatado em relação ao padrão Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB; razão  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C} = 0,01118$ ). Padrões de referência internos (folhas de cana-de-açúcar, razão  $^{13}\text{C}:^{12}\text{C} = -12,80$ ) são rotineiramente intercalados com amostras-alvo (a cada 10 análises) para corrigir os efeitos de massa e deriva instrumental durante e entre as análises. O erro analítico de longo prazo para os padrões internos é de 0,2‰ para  $\delta^{13}\text{C}$ .

As amostras de madeira bruta e após a extração de celulose, foram analisadas no Centro de Isótopos Estáveis da Universidade Estadual Paulista (UNESP, Brasil). As amostras foram pesadas em cápsulas de prata e analisadas para  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  em um espectrômetro de massa de razão isotópica da Thermo Scientific (Delta V Advantage) por meio da interface de gás (ConFlo V) acoplada a um analisador elementar de conversão de alta temperatura (TC/EA).

As razões de isótopos estáveis são expressas em notação  $\delta$  como desvios em relação a padrões internacionalmente reconhecidos em partes por mil (‰). O  $\delta^{13}\text{C}$  foi relatado em relação ao padrão Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) e o  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  foram relatados em relação à Água Oceânica Média de Viena (VSMOW). Para o controle de qualidade interno das análises, durante cada ciclo de leituras, um padrão interno foi usado para garantir a precisão das análises. Os padrões internos foram calibrados contra materiais de referência certificados pelo USGS e IAEA. A incerteza padrão para as análises foi de  $\pm 0,9\%$  para  $\delta^2\text{H}$ ;  $\pm 0,40\%$  para  $\delta^{18}\text{O}$ ; e  $\pm 0,2\%$  para  $\delta^{13}\text{C}$ .

### 4.3 Testes de Atribuição Isotópica

Em parceria com o Perito Criminal Federal Fábio José Viana Costa, do Instituto Nacional de Criminalística foram realizados os testes de atribuição para as nove amostras de madeira provenientes do armazém de retaguarda em Itajaí, SC. Para tanto foi utilizado o pacote AssignR do software R (Ma et al. 2021).

Os testes foram feitos usando as isoscapes de carbono e oxigênio da celulose proveniente de amostras georreferenciadas, que por sua vez, foram coletadas e analisadas no âmbito do projeto INCT-MRFOR, coordenado pelo Dr. Luiz Antonio Martinelli (CENA/USP).

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  das amostras coletadas pelo IBAMA foram fornecidos pelo Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP, e os valores isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  da celulose extraída, analisados pelo laboratório CIE/UNESP, no âmbito do projeto INCT-MRFOR

Em conjunto com as análises isotópicas, foram incluídas nas figuras geradas as coordenadas geográficas declaradas no Documento de Origem Florestal (DOF) de cada amostra.

- Para ilustrar os resultados dos testes de atribuição, foram gerados dois gráficos para cada amostra de madeira: uma figura mostrando a superfície de probabilidade contínua e uma figura mostrando as áreas que correspondem aos 25% de probabilidade superior.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Comparação dos Métodos Isotópicos dos Laboratórios CENA-USP e CIE-UNESP

As análises realizadas pelo CENA/USP de madeira bruta foram feitas em triplicata, para os valores obtidos foi realizado a média e o desvio padrão, a fim de obter os valores que serão utilizados para as análises posteriores, segue abaixo a tabela contendo esses valores.

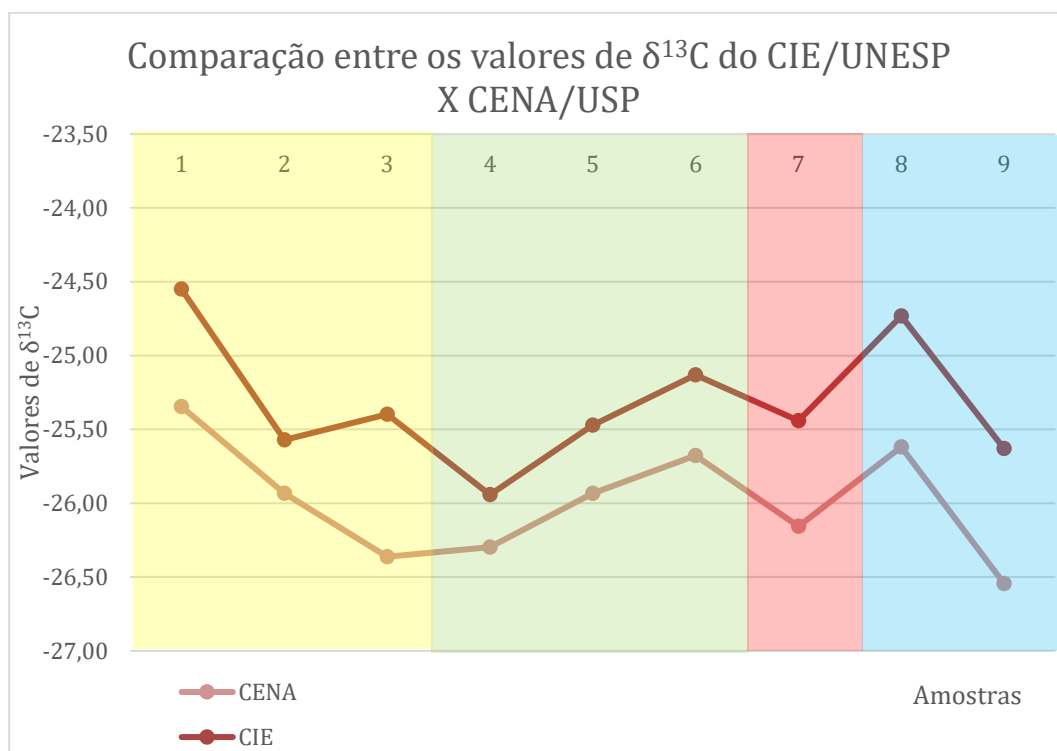
**Tabela 4-** Média  $\pm$  Desvio Padrão das Amostras – CENA/USP

Tabela - Média $\pm$ Desvio Padrão das Amostras – CENA									
Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta^{13}\text{C}$	-25,35	-25,93	-26,36	-26,30	-25,93	-25,68	-26,16	-25,62	-26,54

Fonte: Elaborado pelos autores



Para comparação entre os valores obtidos de  $\delta^{13}\text{C}$  pelos métodos do CIE e CENA foi elaborado um gráfico contendo o número das amostras, e o valor de  $\delta^{13}\text{C}$  obtido em cada um dos laboratórios.



**Figura 9-** Valores de comparação entre o  $\delta^{13}\text{C}$  do laboratório CIE/UNESP e do laboratório CENA/USP.

Legenda:

Localidade das Amostras

Propriedade 1, Apiacás – MT

Propriedade 2, Altamira – PA

Propriedade 3, Colniza – MT

Propriedade 4, Machadinho do Oeste – RO

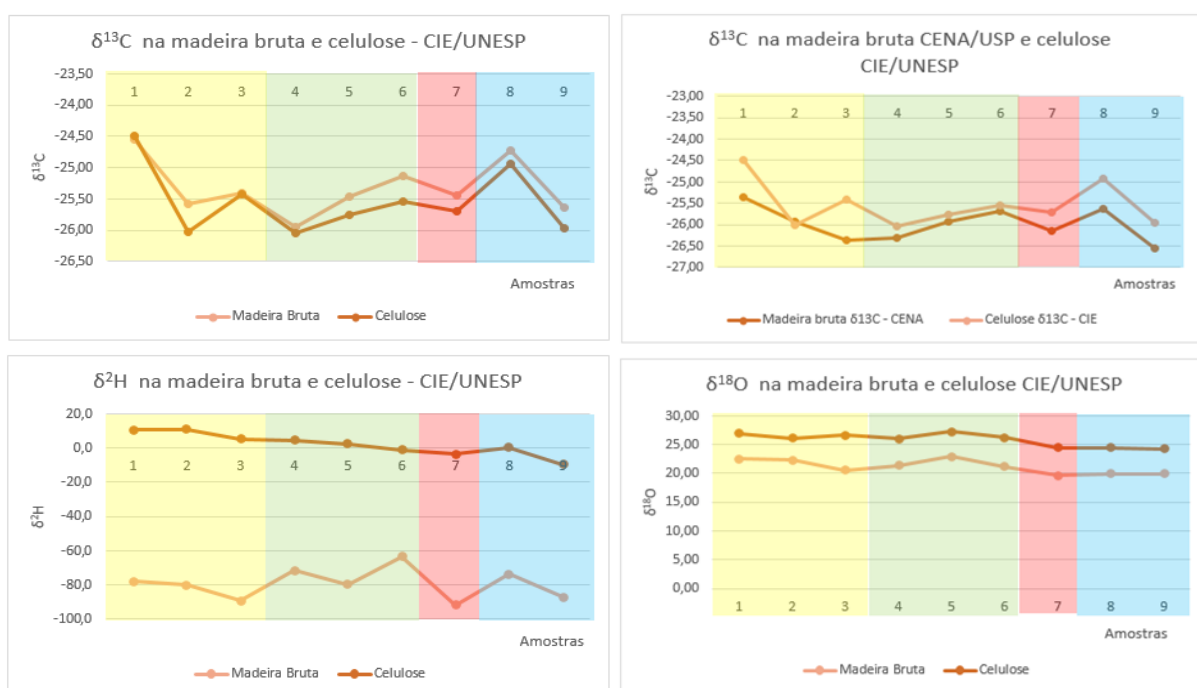
Nota-se que os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de carbono são maiores no CIE. A diferença média entre os valores é de 0,67 com desvio padrão de  $\pm 0,24$ . Além disso, nota-se um padrão na oscilação dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  em ambos os laboratórios.

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  obtidos para a madeira bruta apresentaram variações, que podem ser explicadas pelo uso de métodos e equipamentos distintos em cada análise realizada pelos laboratórios. É importante também considerar que o erro analítico e a incerteza de ambos os laboratórios foram de  $\pm 0,2 \text{ ‰}$  para  $\delta^{13}\text{C}$ .

Somando os erros de cada laboratório temos um erro de  $\pm 0,4\%$ , subtraindo do valor médio da diferença calculada para as amostras que foi de 0,67, temos então assim uma diferença final de 0,27 mostrando uma pequena variação dos valores.

## 5.2 Diferenças Isotópicas entre Madeira Bruta e Celulose

Foram elaborados gráficos comparando os valores isotópicos obtidos para as amostras de madeira bruta e para celulose para os isótopos de C, H e O, também foi elaborado uma tabela com os valores da diferença dos valores isotópicos de cada amostra, assim como a média dessa diferença.



**Figura 10-** Valores obtidos de  $\delta^{13}\text{C}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP,  $\delta^{13}\text{C}$  na madeira bruta CENA/USP e celulose CIE/UNESP,  $\delta^2\text{H}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP e  $\delta^{18}\text{O}$  na madeira bruta e celulose CIE/UNESP.

**Tabela 4-** Diferença entre os valores isotópicos de madeira bruta e celulose

Diferença entre os valores isotópicos de madeira bruta e celulose							
Amostras	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}^*$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	Origem	UF	Nome Popular
1	0,05	0,85	88,33	4,37	Apiacás	MT	Ipê
2	0,45	0,09	91,20	3,82	Apiacás	MT	Ipê
3	0,03	0,94	94,37	6,03	Apiacás	MT	Ipê
4	0,10	0,25	76,24	4,57	Altamira	PA	Ipê
5	0,28	0,18	82,13	4,29	Altamira	PA	Ipê
6	0,42	0,13	62,58	5,02	Altamira	PA	Ipê
7	0,26	0,45	88,18	4,73	Colniza	MT	Cumaru
8	0,20	0,69	74,23	4,55	Machadinho do Oeste	RO	Cumaru
9	0,34	0,58	77,38	4,32	Machadinho do Oeste	RO	Cumaru
<b>Média</b>	0,24	0,46	81,62	4,63			

Legenda

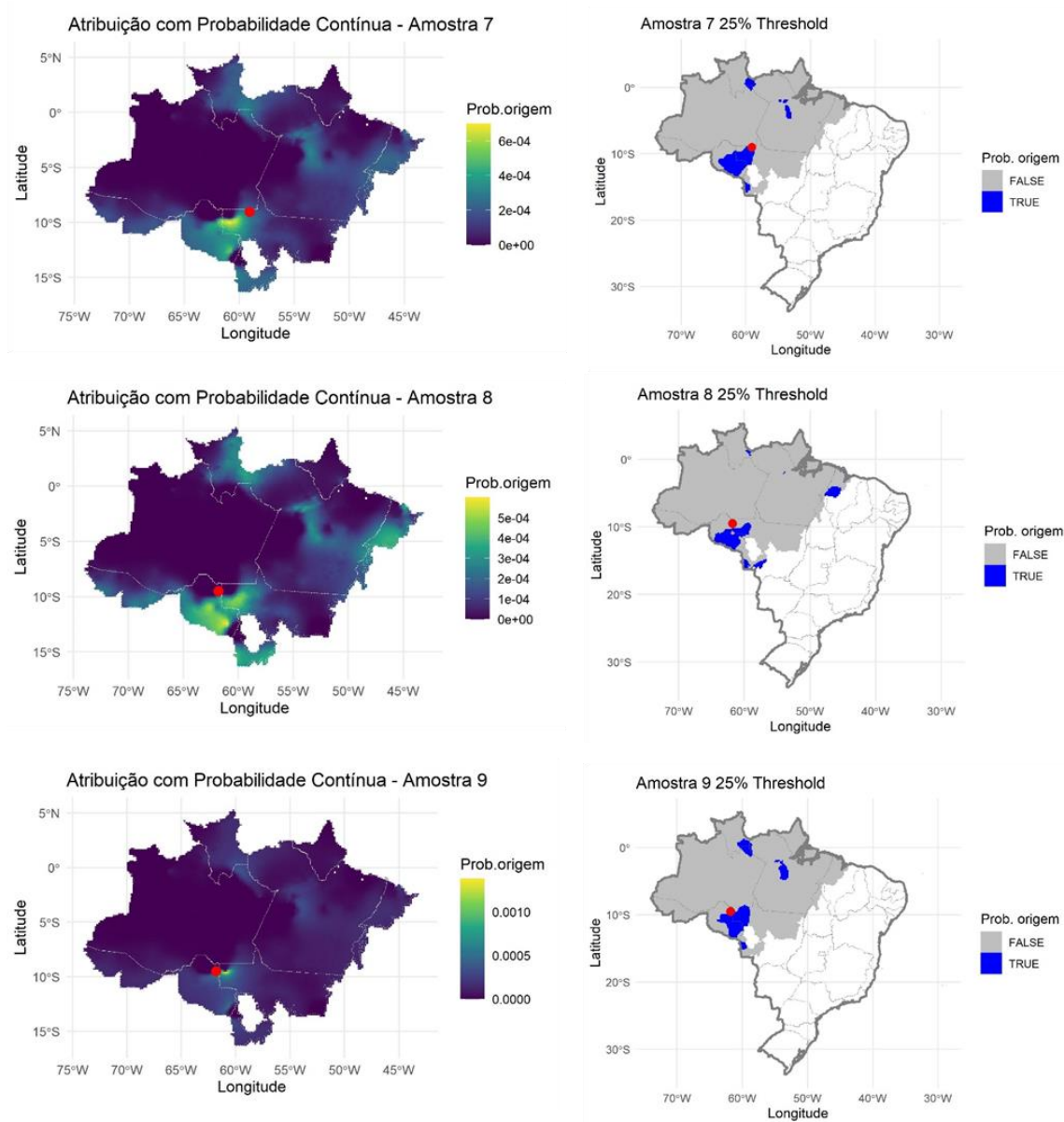
$\delta^{13}\text{C}^*$  - Madeira bruta CENA/USP x Celulose CIE/UNESP

Os valores obtidos para madeira bruta são menores que os de celulose para o  $\delta^{13}\text{C}$ , já para os isótopos de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  o inverso acontece, os valores obtidos para madeira bruta são maiores que os obtidos para a celulose. A maior diferença entre os valores foi de  $\delta^2\text{H}$ , sendo a média dessa diferença de 81,62 e a menor diferença foi do  $\delta^{13}\text{C}$ .

### 5.3 Testes de Atribuição

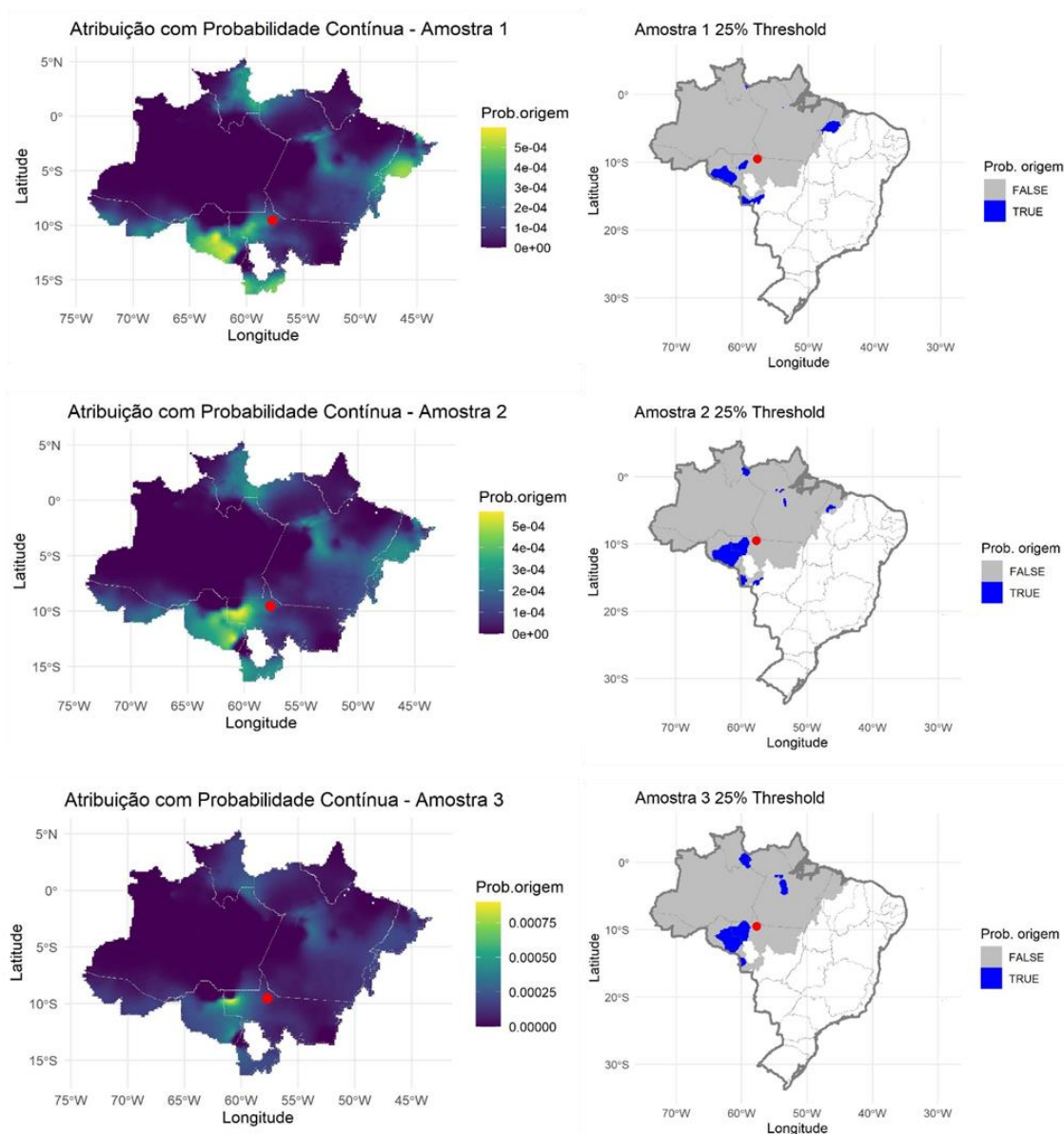
Para a determinação da origem real das amostras foram gerados dois gráficos, um contendo uma figura mostrando a superfície de probabilidade contínua e uma figura mostrando as áreas que correspondem aos 25% de probabilidade superior. Os resultados gerados para a rastreabilidade da madeira estão divididos em 3 grupos de acordo com a proximidade do ponto da localidade declarada em relação às áreas de maior probabilidade de origem verdadeira.

### Amostras dentro do limite:



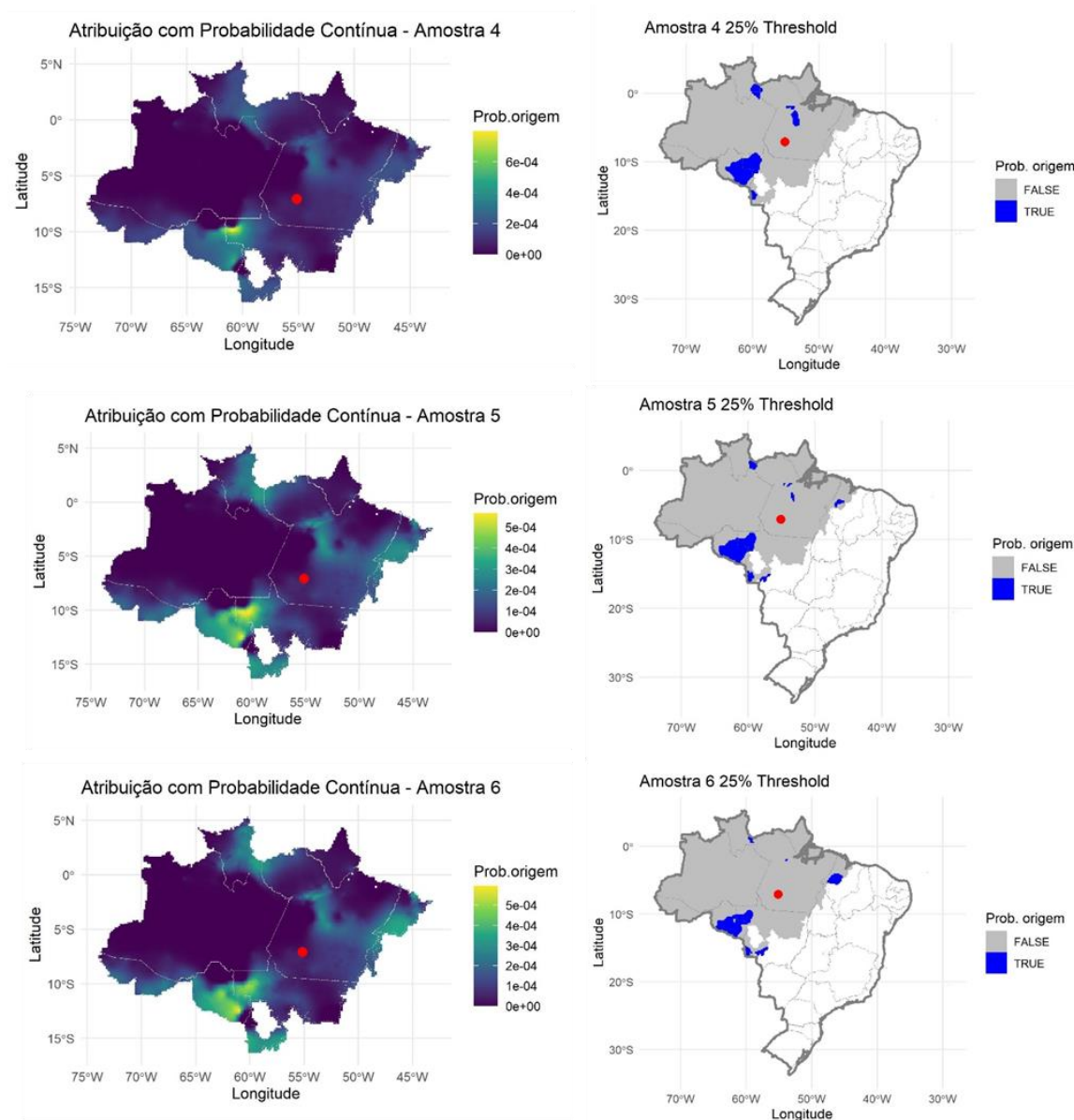
**Figura 11-** A amostra 7, pertencente a propriedade 3, localizada em Colniza – MT, e as 8 e 9 foram pertencente a propriedade 4, que se encontra em Machadinho do Oeste – RO

## Amostras próximo do limite



**Figura 12-** As amostras 1,2 e 3, pertencentes a propriedade 1, localizadas em Apicacás –MT, ficaram próximas do limite de 25%

## Amostras fora do limite



**Figura 13-** As amostras 4,5 e 6, pertencentes a propriedade 3, localizadas em Altamira – PA, ficaram distantes do limite de 25%

Os gráficos gerados para madeira de Ipê (amostras de 1-6) seguem um comportamento padrão, enquanto os para Cumaru (amostras de 7-9) apresentam um outro comportamento padrão. Esse comportamento pode ser entendido como as áreas com maior probabilidade de origem verdadeira, tanto nos gráficos de superfície de probabilidade contínua, quanto nos de 25% de probabilidade superior. Isto nos leva a perceber que existe uma variação isotópica determinada pela espécie da madeira.

As amostras de Cumaru (amostras 7-9) mostraram-se mais próximas do limite, sugerindo uma maior proximidade com a origem declarada. Já as amostras de Ipê (amostras 1-6) apresentaram comportamentos divergentes, com algumas próximas e outras distantes do limite de 25%.

Existe uma correlação entre os focos de exploração ilegal identificados pelo SIMEX e as áreas com maior probabilidade de origem nos gráficos, a correlação entre os dois mapas mostra que a rastreabilidade por meio de isótopos corrobora com os dados levantados pela IMAZOM, o que reforça a eficácia dos métodos de monitoramento utilizados.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A exploração ilegal de madeira é um problema que merece atenção, e apesar de o processo burocrático estar cada vez mais robusto, ele ainda apresenta muitas possibilidades de falha, o que torna esse crime compensador.

Os estudos isotópicos para a rastreabilidade de madeira, embora muito promissores, ainda carecem de pesquisas mais profundas e abrangentes. A pouca quantidade de dados isotópicos referentes à madeira da Amazônia faz com que as análises ainda sejam preliminares.

Para aprimorar a precisão dos modelos de atribuição isotópica em aplicações forenses, a criação de bancos de dados isotópicos é fundamental. Estes bancos de dados, ao seguir um padrão isotópico único, possibilitam comparações mais consistentes entre laboratórios.

A necessidade de protocolos bem definidos para a etapa analítica é de grande relevância, para que as análises possam ser reproduzidas em diferentes locais, facilitando o acesso à geração de dados. As diferenças entre os valores isotópicos obtidos por diferentes métodos ou laboratórios devem ser corrigidas, visando à homogeneidade dos dados gerados, o que facilitará as análises futuras.

O estudo dos dados isotópicos gerados pela análise de madeira bruta e celulose é outro ponto a ser debatido em pesquisas futuras, para entender como essas relações isotópicas variam dependendo da parte da planta analisada. Além disso, é necessário investigar quais dados, de madeira bruta ou celulose, são mais precisos na correlação entre o meio ambiente da planta e sua rastreabilidade.

A geração de ferramentas que auxiliem no controle e fiscalização do processo de exploração de madeira é de suma importância, considerando o papel vital da Amazônia nas questões climáticas, ecológicas e sociais.

Apesar de algumas amostras terem sua localidade declarada próximo as áreas com a maior probabilidade de origem nos gráficos, isso não é suficiente para afirmar a legalidade da exploração madeireira, visto que nos mapeamentos realizados pelo SIMEX, no Mato Grosso existem vários pontos próximos onde é realizado tanto exploração autorizada/(legal), como ilegal.

Já em casos nos quais a origem declarada é diferente daquela mais provável no gráfico pode servir como um indício de que houve alguma ilegalidade no processo de exploração.

Este trabalho demonstrou a viabilidade da rastreabilidade isotópica para o controle da exploração de madeira, embora ainda ocorram desafios técnicos e metodológicos. O aprimoramento contínuo das técnicas e tecnologias empregadas é essencial para alcançar maior precisão e eficácia na identificação da origem da madeira, contribuindo significativamente para o combate à exploração ilegal na Amazônia.



## 7 REFERÊNCIAS

ADEODATO, Sérgio; VILLELA, Malu; BETIOL, Luciana Stocco; MONZONI, Mario. **Madeira: de ponta a ponta - o caminho desde a floresta até o consumo**. 1. ed. São Paulo: FGV RAE, 2011.

Alisson, E. (2014). **Degradação florestal no Brasil preocupa especialistas**. Agência FAPESP.

ALMEIDA, C. A. de et al. **Metodologia para monitoramento da floresta usada nos projetos PRODES e DETER**. Programa de Monitoramento da Amazônia e Demais Biomas – PAMZ+. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2021.

ANDRADE, Maryane Bento Trindade de. **O processo de degradação florestal associado à exploração ilegal de madeira na Rodovia BR-319**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais – PPF-CFT, Manaus, Amazonas, Novembro, 2021.

AZEVEDO, Karina. The Nature Conservancy. **Digitais da Floresta**. 2024.

CÂMARA, Miller Holanda. **Análise da produção madeireira em concessões florestais na Flona do Jamari (RO)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão de Áreas Protegidas na Amazônia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. Manaus, 2019.

CARVALHEIRO, Katia; SABOGAL, César; AMARAL, Paulo. **Análise da Legislação para o Manejo Florestal por Produtores de Pequena Escala na Amazônia Brasileira**. Belém/PA: Projeto ForLive, 2008.

COSTA, F.; SENA-SOUZA, J.; NARDOTO, G. **Determinação da origem geográfica de vestígios utilizando isótopos estáveis: base científica e potencial de uso no Brasil**. Revista brasileira de ciências policiais. v.10, n.1, 2019.

CRIVELLI, Bruno Roberto de Sousa; GOMES, Jefferson Peixoto; MORAIS, Wesley Wilker Corrêa; CONDÉ, Tiago Monteiro; SANTOS, Raylanne de Lima; BONFIM FILHO, Osmar Serra. **Caracterização do setor madeireiro de Rorainópolis, sul de Roraima**. Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 2017.

FARRAPO, Camila Laís. **AVALIAÇÃO DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS NOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES DO GÊNERO Cedrela DA FLORESTA AMAZÔNICA E DA CAATINGA**. 2019. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

FEARNSIDE, P. M. (2022). **Destruição e conservação da Floresta Amazônica**. 1ª edição. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

FERIGATO, Evandro; ROSINI, Alessandro Marco; CONCEIÇÃO, Marcio Magera; CONCEIÇÃO, Joelma Telesi Pacheco. **Desmatamento da Amazônia brasileira**. RMC- Revista Metropolitana de Sustentabilidade v.11, n.1,2021.

FERRO, Poliana Domingos. **Estimativas de desmatamento e queimadas em tempo quase real na Amazônia Sul Brasileira: um passo para popularização de dados**. 2021. Dissertação (Mestrado em Gestão de Áreas Protegidas da Amazônia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus, Amazonas, Fevereiro,2021.

Freire, S. Y. et al. (2014). **Informações do Transporte e do Consumo de Produtos Florestais no Período 2007/2012**. Brasília: IBAMA.

HOLMES, Thomas P.; BLATE, Geoffrey M.; ZWEEDE, Johan C.; PEREIRA JUNIOR, Rodrigo; BARRETO, Paulo; BOLTZ, Frederick. **Custos e Benefícios Financeiros da Exploração Florestal de Impacto Reduzido em Comparação à Exploração Florestal Convencional na Amazônia Oriental**. Belém, 2004.

IMAZON; IDESAM; IMAFLORA; ICV. **Sistema de Monitoramento da Exploração Madeireira (Simex): Mapeamento da exploração madeireira na Amazônia – Agosto 2020 a Julho 2021**. Belém: Imazon, Idesam, Imaflora e ICV, 2021  
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Documento de Origem Florestal (DOF)**.

Lemos, A. L. F., & Silva, J. de A. (2011). **Desmatamento na Amazônia Legal: Evolução, Causas, Monitoramento e Possibilidades de Mitigação Através do Fundo Amazônia**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.

LERER, Rebeca; MARQUESINI, Marcelo. **Tolerância zero: chega de madeira ilegal. Por que a exploração de madeira na Amazônia está fora de controle**. Greenpeace Brasil, dezembro, 2005.

LOPES, Monyck Jeane dos Santos; SANTIAGO, Beatriz Silva; SILVA, Ila Nayara Bezerra da; GURGEL, Ely Simone Cajueiro. **Impacto do desmatamento e queimas na biodiversidade invisível da Amazônia**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA, 2023.

LUEMBA, Matias Emir. **Análise exploratória e visualização de dados florestais brasileiros a partir do Sistema DOF do IBAMA**. 2021. Dissertação (Mestrado em [área de concentração]) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Presidente Prudente, setembro, 2021.

Monteiro, A. L. S., Souza Jr, C. D., Barreto, P. G., Pantoja, F. D. S., & Gerwing, J. J. (2004). **Impactos da exploração madeireira e do fogo em florestas de transição da Amazônia Legal**. Scientia forestalis, 65, 11-21.

MORAES, Luiz Fernando Duarte de; CAMPELLO, Eduardo Francia Carneiro; FRANCO, Avílio Antonio. **Restauração florestal: do diagnóstico de degradação ao uso de indicadores ecológicos para o monitoramento das ações**. Oecologia Australis, v. 14, n. 2, p. 437-451, jun. 2010.

MOREIRA, Kelly Dayanne. **Discriminação de espécies manejadas na Amazônia Central: um princípio para a rastreabilidade da madeira por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Florestas Tropicais – PPG CFT, Manaus, Amazonas, Setembro, 2021. Disponível em:

NARDOTO, Gabriela Bielefeld; MAYRINK, Rodrigo Ribeiro; BARBIERI, Cristina; COSTA, Fábio José Viana. **Isótopos forenses**. Millennium Editora, 2022.

PEREIRA, Alexandre Leandro; BENEDITO, Evanilde. **Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas**. Revista Biociências, Taubaté, v. 13, n. 1-2, p. 16-27, jan./jun. 2007.

TRINDADE DE ANDRADE, Maryane Bento. **O processo de degradação florestal associado à exploração ilegal de madeira na Rodovia BR-319**. Manaus, Amazonas, Novembro de 2021. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA.

WALDHOFF, Philippe; VIDAL, Edson. **Manejo florestal comunitário na Amazônia: comparação entre um modelo introduzido e a extração ilegal de madeira**. Novos Cadernos NAEA, Belém, v. 22, n. 1, p. 51-68, jan./abr. 2019.