



**MINISTERIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
FLORESTAIS**

**GABRIEL MÁXIMO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DO USO DA TERRA NO ESTOQUE  
DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM FLORESTAS  
SECUNDÁRIAS DURANTE OS ANOS DE 2000 E 2014 NO  
ESTADO DO PARÁ, BRASIL**

**BELÉM**

**2020**

**GABRIEL MÁXIMO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DO USO DA TERRA NO ESTOQUE  
DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM FLORESTAS  
SECUNDÁRIAS DURANTE OS ANOS DE 2000 E 2014 NO  
ESTADO DO PARÁ, BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentado ao curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia como parte integrante do requisito para o título de Mestre em Ciências Florestais.

Linha de Pesquisa: Tecnologia de Recursos Florestais

Orientador: Dr. Fabiano Emmert.

Co-orientador: Dr. Marcos Adami

Co-orientador: Dr. Rodrigo Geroni Mendes Nascimento

**BELÉM**

**2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

Máximo da Silva, Gabriel

Influência da Mudança do Uso da Terra no Estoque de Biomassa Acima do Solo em Florestas Secundárias durante os Anos de 2000 e 2014 No Estado do Pará, Brasil / Gabriel Máximo da Silva. - 2020.

65 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Emmert

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Adami.

---

1. Amazônia. 2. Mudança Climática. 3. Desmatamento. 4. LiDAR. I. Emmert, Fabiano, orient. II. Título

CDD 621.3678

**GABRIEL MÁXIMO DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DO USO DA TERRA NO ESTOQUE  
DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM FLORESTAS  
SECUNDÁRIAS DURANTE OS ANOS DE 2000 E 2014 NO  
ESTADO DO PARÁ, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais: Área de concentração em Tecnologia de Recursos Florestas, para Exame de Defesa e obtenção do título de Mestre.

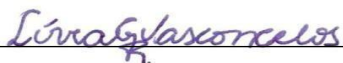
Aprovado em 14 de fevereiro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Dr. Fabiano Emmert – (Presidente/Orientador)  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA



---

Dr. Livia Gabrig Turbay Rangel Vasconcelos (1ª Examinadora)  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



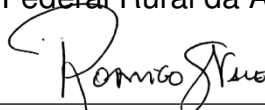
---

Dr. David Roberto Galbraith (2ª Examinador)  
University of Leeds



---

Dr. Deusdedith Cruz Filho (3º Examinador)  
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



---

Dr. Rodrigo Silva do Vale (Suplente)  
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal Rural da Amazônia que foi minha casa nos últimos 9 anos, somando graduação mais mestrado. Esta casa que me proporcionou tantas oportunidades de aprendizado e de vida. Foi esta universidade que me fez sair do país pela primeira vez e diante disso tantas outras oportunidades me surgiram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimento pelo financiamento de minha bolsa de estudos durante o período de Mestrado, no qual foi imprescindível para que eu pudesse dar andamento nas minhas atividades diárias e me dedicar à pesquisa.

Um agradecimento especial ao meu orientador Fabiano Emmert, que abraçou a ideia de minha pesquisa e pode conduzir meu pensamento científico num caminho de muitas descobertas científicas. Agradeço por me orientar com maestria e principalmente com paciência. Agradeço também meus coorientadores Rodrigo Geroni e Marcos Adami, os quais foram muito mais que coorientadores, me incentivaram e me abriram a mente para novos métodos de análises e me propuseram desafios fundamentais para o resultado deste trabalho.

Ao Marcos Adami, meu honesto e impagável agradecimento. Minha gratidão será eterna pelo acolhimento no INPE-CRA desde minha graduação enquanto bolsista de iniciação científica. E no mestrado, me deu a oportunidade de desenvolver um pouco mais de minha pesquisa na Universidade de Leeds. Nesta mesma Universidade, tive a oportunidade de conhecer o Dr. David Galbraith o qual foi uma pessoa fundamental em minha pesquisa, não só como componente de minha banca de defesa, mas como um pesquisador referência de comprometimento com a ciência. Minha gratidão é eterna por todos os professores que passaram de alguma forma pela minha trajetória durante meu caminho científico.

Agradeço à banca pelas contribuições que foram sugeridas durante a defesa e pós defesa com todos os conhecimentos passados que foram aplicados neste trabalho.

A família Labfor pelos trabalhos juntos, idas à campo, e a simples e aconchegante companhia durante estes dois anos de mestrado. Vocês foram fundamentais para minha continuidade na batalha diária da dissertação.

A coordenação da pós graduação em Ciências Florestais que me deu todo o suporte e apoio que precisei e muito mais do que isso. Em especial a professora Lina Bufalino e a secretária Andreza.

Aos meus amigos do coração que conheci na Universidade e levarei comigo pra sempre: Madson Oliveira, Talita Bezerra, Elizane Arraes, Caio Soares, Vitor Moraes e Afonso Oliveira.

Ao Oswaldo Dias por ter estado comigo nesta caminhada desde meu ingresso ao mestrado, por ter tido muita paciência e ter me dado suporte nessa caminhada que foi tão conturbada, minha eterna gratidão e carinho.

A minha família tão amada: mãe, pai, irmã e minha sobrinha que são parte de mim como um todo e jamais eu seria o que sou sem eles. Toda a história de luta da minha família me impulsiona cada dia mais para seguir meu caminho. Obrigado por tudo, amo muito todos vocês!

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”*

*Isaac Newton*

## RESUMO

Florestas secundárias prestam importantes serviços ecossistêmico, especialmente no auxílio da mitigação das mudanças do climática. O expressivo ritmo de crescimento ocasiona a intensiva retira CO<sub>2</sub> atmosférico e o armazenamento de carbono na biomassa das espécies arbóreas. Esse serviço depende das condições de regeneração e desenvolvimento das florestas secundárias, que são influenciadas pelo uso anterior, a magnitude das perturbações e a duração dos distúrbios. Portanto, faz-se necessário a compreensão do processo de formação das florestas secundárias para identificar os potenciais de mitigação do aquecimento global em função dos contextos regionais de uso e mudança do uso da terra na Amazônia. Para analisar os fatores influentes e as estimativas de biomassa e carbono em florestas secundárias, destacam-se os que métodos que combinam dados de inventário florestal e sensoriamento remoto, como imagens de sensores de satélites e nuvens de pontos obtidas por LiDAR (*Light Detection and Ranging*), com modelagem matemática e espacial. Neste contexto, a presente pesquisa objetivou conhecer a distribuição espacial e estimar o acúmulo de biomassa em florestas secundárias no estado do Pará. Os padrões espaciais das florestas secundárias no Pará foram avaliados por algoritmos de densidade de Kernel e pela análise *hotspot* utilizando dados fornecidos pelo projeto TerraClass. Para mapear a regeneração das florestas secundárias, utilizaram-se dados de classe de uso da terra para atribuir o uso anterior nos anos de 2000, 2004, 2008, 2010, 2012 e 2014. Por meio de modelagem cartográfica, verificou-se a permanência e o surgimento de florestas secundárias na cronosequência analisada, possibilitando identificar faixas de idade em cada ano de estudo e por classe de uso anterior. Foram combinados dados da estimativa de biomassa resultante de modelagem estatística de LiDAR com inventários florestais para florestas secundárias nos municípios de Paragominas e Santarém fornecidos por Longo et al. (2016), Almeida et al. (2019) e Baccini et al. (2012), assim como dados de biomassa estimada em floresta primária provenientes do projeto RainFor. Os resultados mostraram que a distribuição espacial das florestas secundárias não ocorre de forma aleatória no espaço, sugerindo influências geopolíticas locais. Considerando a dinâmica das florestas secundárias na paisagem do Estado, o balanço positivo de 16,0 mil km<sup>2</sup> entre 2012 e 2014 diminuiu 2,4% em relação ao período de 2010 e 2012. A diminuição das áreas de florestas secundárias foram influenciadas pelo alta taxa de desmatamento (11,5 mil km<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>), quase três vezes maior que a taxa de incremento (4,3 mil km<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>) entre 2012 e 2014. Verificou-se que houve acúmulo de biomassa médio em florestas secundárias acima de 14 anos é de 73,57 MgC.ha<sup>-1</sup>, correspondendo em média a 27,48% da biomassa de uma floresta madura na mesma região a para os dois municípios sendo significativo ( $p < 0,001$ ) ao longo do tempo nas idades de florestas secundárias. Houve diferença significativa ( $p < 0,001$ ) entre as biomassas comparando os municípios de Paragominas e Tapajós quando relacionados os acúmulos de biomassa no período de tempo estudado para as três bases de dados. As florestas secundárias advindas de florestas maduras ou pastagem recuperam mais biomassa ao longo do tempo e é dependente da idade.

**Palavras-Chave:** Amazônia; Mudança climática; Desmatamento; LiDAR

## ABSTRACT

Secondary forests provide important ecosystem services, especially in helping to mitigate climate change. The expressive growth rate causes the intensive removal of atmospheric CO<sub>2</sub> and the storage of carbon in the biomass of tree species. This service depends on the conditions of regeneration and development of secondary forests, which are influenced by previous use, the magnitude of the disturbances and the duration of the disturbances. Therefore, it is necessary to understand the formation process of secondary forests in order to identify the potential for mitigating global warming due to the regional contexts of land use and change in land use in the Amazon. In order to analyze the influential factors and the estimates of biomass and carbon in secondary forests, we highlight the methods that combine data from forest inventory and remote sensing, such as images from satellite sensors and point clouds obtained by LiDAR (Light Detection and Ranging), with mathematical and spatial modeling. In this context, the present research aimed to know the spatial distribution and estimate the accumulation of biomass in secondary forests in the state of Pará. The spatial patterns of secondary forests in Pará were evaluated by kernel density algorithms and by hotspot analysis using data provided by the project TerraClass. In order to map the regeneration of secondary forests, data on land use class were used to attribute the previous use in the years 2000, 2004, 2008, 2010, 2012 and 2014. Through cartographic modeling, the permanence and the emergence of secondary forests in the analyzed chronosequence, making it possible to identify age groups in each year of study and by class of previous use. Biomass estimate data resulting from LiDAR statistical modeling were combined with forest inventories for secondary forests in the municipalities of Paragominas and Santarém provided by Longo et al. (2016), Almeida et al. (2019) and Baccini et al. (2012), as well as biomass data estimated in primary forest from the RainFor project. The results showed that the spatial distribution of secondary forests does not occur randomly in space, suggesting local geopolitical influences. Considering the dynamics of secondary forests in the state's landscape, the positive balance of 16.0 thousand km<sup>2</sup> between 2012 and 2014 decreased by 2.4% in relation to the period from 2010 to 2012. The decrease in secondary forest areas was influenced by the high-rate deforestation (11,500 km<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>), almost three times the rate of increase (4,300 km<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>) between 2012 and 2014. It was found that there was an accumulation of average biomass in secondary forests above of 14 years is 73.57 MgC.ha<sup>-1</sup>, corresponding on average to 27.48% of the biomass of a mature forest in the same region a for both municipalities, being significant ( $p < 0.001$ ) over time at the ages of secondary forests. There was a significant difference ( $p < 0.001$ ) between biomasses comparing the municipalities of Paragominas and Tapajós when related to the accumulation of biomass in the studied period for the three databases. Secondary forests from mature forests or pasture recover more biomass over time and are age dependent.

**Keywords:** Amazon; Climate change; Deforestation; LiDAR



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	TESTE DE HIPÓTESES.....	13
1.1.1	<b>Teste 1.....</b>	<b>13</b>
1.1.2	<b>Teste 2.....</b>	<b>14</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
3.1	Uso da terra no contexto de emissões de gases do efeito estufa .....	18
3.2	Florestas secundárias .....	20
3.3	Biomassa e estoque de carbono .....	21
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
4.1	Localização da área de estudo.....	22
4.2	Mudança de uso da terra e floresta secundária .....	24
4.3	Análise da distribuição espacial das florestas secundárias.....	26
4.4	Análise do balanço de áreas em florestas secundárias no Pará .....	29
4.5	Modelagem da biomassa pelo uso anterior da terra .....	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização das parcelas na área de estudo.....	24
Figura 2. Classificação da metodologia utilizada.....	29
Figura 3. Representação do processamento dos dados espaciais.....	31
Figura 4. Distribuição dos tamanhos das florestas secundárias maiores que 6,25ha mapeadas entre 2000 e 2014.....	33
Figura 5. Incidência de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 ..	34
Figura 6. Análise "hot spot" da incidência total de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	35
Figura 7. Densidade de fragmentos (incidência/km <sup>2</sup> ) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	36
Figura 8. Análise "hot spot" da densidade de fragmentos de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	37
Figura 9. Área média (ha) dos fragmentos de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	37
Figura 10. Área total (ha) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014.....	38
Figura 11. Análise "hot spot" da área total de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	39
Figura 12. Análise "hot spot" da incidência de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	40
Figura 13. Mapa de Densidade de Kernel no estado do Pará .....	41
Figura 14. Desmatamento de Florestas primárias em função das Florestas secundárias por área do município .....	42
Figura 15. Distribuição dos fragmentos de florestas secundárias desflorestados entre 2000 e 2014.....	43

Figura 16. Balanço de ganhos e perdas de florestas secundárias no Pará entre 2000 e 2014 .....	45
Figura 17. Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (LONGO et al., 2016) .....	46
Figura 18. Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (ALMEIDA et al., 2019) .....	48
Figura 20. Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (BACCINI et al., 2012) .....	50
Figura 21. Recuperação de Biomassa de acordo com o uso anterior da terra referente à base de dados de Longo, et al. (2016) .....	53
Figura 22. Recuperação da Biomassa de acordo com o uso anterior da terra segundo a metodologia de Almeida et al., (2019) .....	54
Figura 23. Recuperação da Biomassa de acordo com o uso anterior da terra segundo a metodologia de Baccini et. al (2012).....	55

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Principais classes de uso e cobertura da terra .....	25
Tabela 2. Classificação da idade de florestas secundárias em intervalos de classe .....	26
Tabela 3. Estatística descritiva dos fragmentos (>6,25 ha) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 .....	33
Tabela 4. Desmatamento total no estado do Pará.....	42
Tabela 5. Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de Longo et al., (2016) .....	46
Tabela 6. Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de (LONGO et al., 2016).....	47

Tabela 7. Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de (ALMEIDA et al., 2019).....	48
Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de Ometto et al, (2016) .....	49
Tabela 9. Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de (BACCINI et al., 2012).....	51
Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de (BACCINI et al., 2012) .....	51

# 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As florestas secundárias têm um papel fundamental com a retirada da pressão exercida sobre as florestas primárias na Amazônia brasileira, bem como suas funções ecológicas que provêm serviços ambientais para região em seu entorno (SERRÃO; TOLEDO, 1990; SERRÃO; HOMMA, 1990, apud PEREIRA; VIEIRA, 2001). No contexto da mudança climática, florestas secundárias provém o serviço rápido e de baixo custo de sequestro de carbono atmosférico, estocado em grandes quantidades na parte lenhosa das árvores (CHAZDON et al., 2016). A promoção desse e outros serviços ecossistêmicos está relacionada, primariamente, ao processo de regeneração natural, que é influenciado pelo uso anterior, forma e tempo de abandono, clima, solos e dispersão de sementes por florestas maduras nas áreas adjacentes à paisagem (CHAZDON, 2014). Portanto, faz-se necessário a compreensão integrada da dinâmica de sua formação das florestas secundárias com as mudanças no uso da terra.

Dentre os métodos utilizados para estimativa de biomassa, destaca-se a utilização do sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*), permitindo precisão não só de biomassa mas também de outras variáveis biológicas em áreas intactas ou degradadas (LONGO et al., 2016). Esse método é combinado com técnicas de geoprocessamento, como de álgebra de mapas, permitindo gerar informações refinadas das nuvens de pontos associadas com verdades de campo e extrapolar com precisão (*up scaling*) para áreas maiores. No presente estudo, essas técnicas foram aplicadas para mapear a idade das florestas secundárias durante 14 anos de monitoramento do TerraClass (ALMEIDA et al., 2016). Com isso, a combinação desses métodos permitiu analisar a influência da dinâmica das classes de uso da terra nas áreas e no crescimento das florestas secundárias.

Neste contexto, a pesquisa buscou entender como o processo de uso da terra influencia distribuição espacial dos fragmentos florestais e a recuperação de biomassa e carbono no estado do Pará. A distribuição espacial, a recuperação de biomassa e acúmulo de carbono foram analisadas durante a os anos de 2000 a 2014. As análises foram realizadas utilizando dados espaciais de mapeamento do uso da terra do projeto TerraClass combinados a dados LiDAR, biomassa e inventário em florestas secundárias com intervalos de idade

que variam entre 0 a 14 anos. A partir da análise de biomassa em diferentes florestas secundárias de mesmas idades, foi analisado como o uso anterior da terra contribui para o acúmulo de biomassa. Os resultados poderão servir como auxílio de tecnologias que permitam tal mapeamento onde os resultados poderão dar suporte ao desenvolvimento de políticas de estabilização da mudança do uso da terra, especialmente baseadas na manutenção e fortalecimento do estoque de carbono em florestas secundárias.

## 1.1 Teste de hipóteses

### 1.1.1 Teste 1

O TerraClass é um sistema oficial de monitoramento da mudança do uso da terra na Amazônia baseado mapeamento por imagem de satélite dentro de um sistema de informações geográficas, que permite qualificar e quantificar classes de uso da terra. Focando na classe de uso de florestas secundárias devido sua importância ecossistêmica na mitigação da mudança do clima, o que os dados desse sistema de monitoramento estão revelando sobre os padrões de distribuição espacial dos fragmentos de florestas? Existe efeito da mudança de uso da terra na ocorrência (incidência e tamanho) de florestas secundárias ao longo de 14 anos no estado do Pará? Para responder essas questões, foram formuladas as seguintes hipóteses (nulas):

$H_0$ : A distribuição espacial de florestas secundárias, analisada pela incidência (número de fragmentos) e pelo tamanho (área), segue a completa aleatoriedade espacial (CAE) no estado do Pará, ou seja, não há influências locais.

Objetivo geral:

Analisar a variação espacial e temporal da quantidade, do tamanho e da dinâmica dos fragmentos de florestas secundárias considerando o aspecto geopolítico em nível de município durante os anos de 2000 a 2014 no estado do Pará.

### Objetivos Específicos:

1. Quantificar o número (incidência) e o tamanho (área) dos fragmentos de florestas secundárias dos municípios em cada período de monitoramento por meio de modelagem cartográfica;
2. Analisar o padrão de distribuição espacial (incidência e do tamanho) do desenvolvimento de florestas secundárias por meio de geoestatística de agrupamentos;
3. Verificar o balanço ou acúmulo de florestas secundárias a partir da quantificação de ganhos e perdas de florestas secundárias no estado do Pará ao longo do tempo.

#### 1.1.2 Teste 2

A biomassa acima do solo é de grande importância para estudos em florestas de ecossistemas tropicais. Com o avanço das tecnologias dos sensores e do sensoriamento remoto, as possibilidades de se estimar biomassa acima do solo têm se tornado cada vez interessantes. Nessa direção, pesquisas tem apresentado resultados de estimativas de biomassa com abrangência continental. Dados e resultados têm sido disponibilizados e compartilhados livremente para que cientistas consigam melhorar a precisão das estimativas, como os mapas em formato digital de densidade de biomassa da Amazônia produzidos por Baccini et al. (2012) e Almeida et al., (2019). Se combinarmos fontes secundárias locais e continentais de dados de biomassa com dados regionais do TerraClass, bem como locais de LiDAR e inventário florestal, é possível quantificar a recuperação de biomassa de florestas secundárias em diferentes classes de idade ao longo de 14 anos de monitoramento? Qual o tipo de uso da terra que possui maior recuperação de biomassa ao longo de 14 anos? Para responder esta questão foram formuladas as seguintes hipóteses (nulas):

$H_0$ : A recuperação de biomassa acima do solo não é detectável durante os anos de 2000 a 2014, ou seja, independe da classe de idade ao longo do tempo.

$H_0$  O tipo de uso da terra não tem influência na recuperação de biomassa.

Objetivo Geral: Avaliar como as mudanças de uso da terra influenciam na recuperação da biomassa em florestas secundárias.

Objetivos Específicos:

1. Mapear florestas secundárias com diferentes idades com base nos dados do TerraClass utilizando modelagem cartográfica;
2. Combinar a localização geográfica das florestas secundárias de diferentes idades com os dados de biomassa de diferentes fontes de dados disponíveis;
3. Comparar a variação da recuperação de biomassa acima do solo em diferentes classes de idades por diferentes bancos de dados;
4. Analisar a variação da recuperação de biomassa em relação as classes de uso da terra anteriores à classificação de floresta secundárias;

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. T. et al. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, n. March, p. 111323, 2019.

ALMEIDA, C. A. DE et al. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 3, p. 291–302, 2016.

BACCINI, A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 3, p. 182–185, 2012.

CHAZDON, R. L. **Second Growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation**. Chicago e Londres: University of Chicago Press, 2014. v. 32

CHAZDON, R. L. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, p. 1–10, 13 maio 2016.

EMBRAPA; INPE. **TerraClass: Organização, Acesso e Transparência**. Disponível em: <<https://www.terraclass.gov.br>>. Acesso em: 27 fev. 2020



LONGO, M. et al. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639–1660, nov. 2016.

## 2 INTRODUÇÃO

O aumento das áreas de florestas tem sido observado nas últimas décadas em várias partes do mundo e em alguns países supera o desmatamento com um balanço positivo. As florestas secundárias regeneram-se em áreas anteriormente desmatadas e são vistas como componente da paisagem potencialmente gerador de serviços ecossistêmicos, especialmente para a mitigação da mudança climática (CHAZDON, 2014; MARENGO et al., 2009; POORTER et al., 2016; ROZENDAAL et al., 2017). Na Amazônia brasileira, as perdas de florestas superam há três décadas os ganhos (Programa de monitoramento da Amazônia brasileira, INPE, 2019), mas a regeneração de florestas secundárias tem sido observada pelo sistema nacional de monitoramento do uso da terra (ALMEIDA et al., 2016). Nesse contexto, o estudo buscou ampliar o entendimento sobre o papel da regeneração de florestas secundárias no atual processo de mudança de uso da terra na Amazônia Legal.

O risco da mudança do clima na Amazônia é iminente. As estimativas de mudanças são alarmantes e despertam o interesse global da população sobre o assunto. Entretanto, não se deve apenas atentar a mudança prevista para o clima, mas também aos produtos derivados destas mudanças como a mudanças do uso e cobertura da terra, fragmentação da floresta e fogo (MARENGO et al., 2009). Deste modo, é importante entender como aspectos de mudanças de uso da terra, bem como seu histórico de alteração, influenciam na mudança regional do clima por meio do balanço de energia da superfície, do balanço hídrico e, por conseguinte, do ciclo do carbono, especialmente na região da Amazônia (FOLEY et al., 2005).

Apesar de ainda haver grandes incertezas sobre os cenários futuros, algumas projeções têm mostrado que, nas próximas décadas, há riscos de mudanças abruptas e irreversíveis, em parte ou talvez em toda a Amazônia. Uma consequência ecológica é a substituição das florestas ombrófilas por vegetação

do tipo savana (LOVEJOY; NOBRE, 2018), acarretando na perda de biodiversidade em grande escala, afetando parte dos meios de subsistência dos povos da região (MARENGO et al., 2009). Contudo, os impactos causarão a perda de oportunidades para o uso sustentável da floresta e a produção de mercadorias tradicionais, tanto por manejo florestal para madeira como por extração de produtos não-madeireiros (FEARNSIDE, 2006).

No cenário atual, o desmatamento tem sido um dos principais problemas ambientais na Amazônia. Até o ano de 2018, as áreas desflorestadas na Amazônia Legal corresponderam a 772.554km<sup>2</sup>, sendo o estado do Pará o que mais contribuiu com 241.738km<sup>2</sup> (INPE, 2020). As florestas tropicais têm sido submetidas à perda de boa parte de sua composição biótica pela alta taxa de desmatamento e degradação de seus ambientes, aceleradas pelo desenvolvimento de áreas urbanas, para obtenção de matérias primas diversas ou pela substituição por sistema de produção (BIANCHI, 2009). O processo de conversão das áreas florestais em agropecuárias caracteriza-se pelo elevado prejuízo econômico, pela perda de biodiversidade, pelos danos ao solo e pela emissão de carbono (PASSOS; BRAZ, 2004). No projeto TerraClass, as florestas secundárias são mapeadas por meio de áreas previamente desflorestadas acima de 6,25ha detectadas pelo PRODES utilizando uma metodologia semiautomática (ALMEIDA et al., 2016).

No contexto desse sistema de monitoramento, entende-se por florestas secundárias a formação vegetal natural em processo de regeneração, caracterizada pelo adensamento de espécies arbóreas, que já tenham sofrido supressão total da vegetação original, desde o início do monitoramento do desmatamento da Amazônia (ALMEIDA et al., 2016; COUTINHO et al., 2013). Entretanto, ainda há muito a se estudar sobre o comportamento das florestas secundárias, mesmo em relação à taxa de recuperação de biomassa e como essas taxas podem ser influenciadas pelo clima, tipo de composição florística e o uso anterior da terra (CHAZDON, 2014; IPCC, 2008). É importante entender a dinâmica da expansão das florestas secundárias e como elas são distribuídas espacialmente na região.

Anos de exploração florestal ilegal deixaram cicatrizes em toda Amazônia, representadas por um verdadeiro mosaico de áreas degradadas (ASNER, 2005;

MORTON et al., 2013). A limitação de estudos em larga escala e de longo prazo sobre queimadas e impactos da exploração florestal dificulta a quantificação da emissão de carbono proveniente da degradação da Amazônia (LE QUÉRÉ et al., 2016). Atualmente, o monitoramento do território combina técnicas de sensoriamento remoto para detectar mudanças de uso da terra no combate ao desmatamento (GRAÇA et al., 2009). O monitoramento por meio de inventários florestais com parcelas permanentes é fundamental para quantificar a mudança de estoques em função da mudança do uso da terra, mas a escala continental da Amazônia impõe limitações econômicas e operacionais. Para superar problemas de escala entre imagens de satélite e rede parcelas de monitoramento florestal em campo, tecnologias de sensoriamento remoto como o sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*) funcionam como fonte de dados que permite o escalonamento das estimativas com precisão. Dados Lidar permitem descrever de forma tridimensional a estrutura da floresta afim de possibilitar a estimativa de biomassa acima do solo (LONGO et al., 2016), e possuem abrangência espacial superior as áreas de várias parcelas, podem recobrir grandes áreas de vegetação.

Neste contexto, o presente estudo buscará responder (i) como o acúmulo de biomassa em florestas secundárias varia regionalmente em função do uso anterior da terra na Amazônia e se (ii) existe algum padrão espacial para o acúmulo de biomassa em florestas secundárias. Mediante ao exposto, faz-se importante entender como se dá a distribuição das florestas secundárias no estado do Pará, bem como entender a dinâmica de mudança de uso da terra na região pelos históricos de uso e tais influências na mitigação das mudanças no clima.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Uso da terra no contexto de emissões de gases do efeito estufa**

As regiões tropicais detêm características peculiares em relação as mudanças de uso da terra. Os cortes rasos e derrubada e queimada são tradicionalmente praticados nos trópicos, com a supressão total da vegetação. Havendo perda, sobressaindo à dinâmica do desmatamento (HANSEN et al.,

2013). Tal dinâmica tem sido acentuada nas regiões tropicais gerando desbalanceamento no ciclo global do carbono, logo, é notada a importância do conhecimento da dinâmica de biomassa em florestas secundárias oriundas de mudanças de uso da terra em séries históricas (POORTER et al., 2016). Tais mudanças iniciam-se com a retirada da cobertura vegetal original da floresta madura, então é realizado o corte e queima ou apenas corte raso onde posteriormente se tornam áreas para cultivos agrícolas, pastos e em alguns casos silvicultura (SHANMUGAM et al., 2018).

Com a queima e a retirada da biomassa, ocorre a emissão de gases que muito contribuem para o efeito estufa interferindo nos ciclos biogeoquímicos do ambiente. Apesar da grande emissão de CO<sub>2</sub> advinda do desmatamento, com o surgimento das florestas secundárias, em locais antes desmatados, há a reabsorção do CO<sub>2</sub> durante a regeneração da floresta, porém outros gases emitidos como o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) não são absorvidos (FEARNSIDE, 2006).

Para mapear o uso e cobertura da terra, foram utilizados dados do projeto TerraClass o qual classifica áreas previamente mapeadas pelo PRODES (Programa de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite, INPE, 2019). Essa classificação do desmatamento é subdividida em 12 classes temáticas de uso e ocupação da terra, que incluem pastagens, culturas agrícolas, floresta secundária, reflorestamento, áreas urbanas e outras (ALMEIDA et al., 2016). Há campanhas de validação dos dados que determinam a acurácia da classificação. Até então, estes são os melhores dados disponíveis ao público em geral com informações sobre as florestas secundárias nas regiões dos trópicos. Entretanto, a classificação é baseada em habilidades visuais dos intérpretes considerando-se todo o treinamento e experiência individual de cada indivíduo, há limitações como a ausência de detecção de degradações, por exemplo.

### 3.2 Florestas secundárias

As florestas secundárias surgem como áreas com vegetação abandonadas advindas de corte raso, ou seja, apenas por ações antrópicas e que se regeneram espontaneamente por meio dos efeitos de sucessão florestal, embora toda floresta tropical já tenha sofrido algum impacto sobre as ações humanas (CORLETT, 1994). Logo, florestas secundárias são florestas ainda não maduras consideradas jovens (0 a 20 anos) ou de média idade (20 a 60 anos) que ainda não desenvolveram características próximas de florestas maduras da mesma região e clima (CHAZDON, 2014; CHAZDON et al., 2016).

A regeneração destas florestas sofre forte influência de fatores ambientais e estão diretamente ligadas à mudança de uso da terra (CHAZDON et al., 2009; GUARIGUATA; OSTERTAG, 2001; MESQUITA et al., 2015). Em outro ponto, as florestas secundárias sofrem corte e queima na Amazônia em média a cada 5 anos (AGUIAR et al., 2016), portanto, faz-se necessário a compreensão do balanço da regeneração destas florestas secundárias para melhor entender as relações que a envolvem.

Após um distúrbio na floresta tem-se a abertura de clareiras, no qual a floresta passa por um processo de recuperação iniciando a sucessão florestal e, por fim, ocorre o fechamento do dossel (NEMER, 2014). A exposição à luz é um dos fatores fundamentais para o estabelecimento e desenvolvimento de plântulas (MASSOCA et al., 2012). Maior exposição a luz ocasionará o recrutamento de espécies pioneiras em maior quantidade, por outro lado, com menor exposição à luz, espécies tolerantes à sombra tendem a manifestar-se majoritariamente.

A sucessão secundária refere-se às alterações provocadas em um ecossistema, no qual ocorre a perda parcial dos seres vivos que ali existiam (WADSWORTH, 1997). Segundo Maciel et al., (2002) o processo de sucessão natural ocorre após a formação de clareiras, provocadas pela morte ou queda natural de árvores no interior da floresta. Em florestas urbanas ou periurbanas, a sucessão acontece de forma dissemelhante, pois, devido à proximidade com o ambiente urbano que aumenta as chances de perturbações antrópicas de modo constante, impactando o processo de sucessão natural (JOPPA; PFAFF, 2011; MEINERS et al., 2015). As perturbações como poluição da água,

incêndios, caça predatória e deposição de lixo provocam impactos no arranjo e composição, assim como nas características funcionais da floresta (AMLIN; SURATMAN; ISA, 2012).

### 3.3 Biomassa e estoque de carbono

O efeito estufa é um fenômeno natural onde gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxidos de nitrogênio permitem que a luz visível de onda curta do sol chegue à superfície da Terra, porém impedem que a luz infravermelha de ondas longas volte ao espaço, aquecendo a atmosfera (JUNGES et al., 2018). A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre vem aumentando principalmente após a Revolução Industrial (1760) devido ao uso de combustíveis fósseis e o desmatamento e queimada das florestas (NOBRE; REID; VEIGA, 2012). Esse aquecimento da atmosfera ainda não possui consequências claras, entretanto é possível supor que minimamente ocorreram mudanças de vários níveis no comportamento dos seres vivos. E devido à falta de informações concretas, é importante pesquisar e entender os processos que retiram CO<sub>2</sub> da atmosfera, como por exemplo a fotossíntese realizada pelos vegetais.

Durante o processo de fotossíntese, os vegetais retiram da atmosfera o CO<sub>2</sub> para a formação de compostos orgânicos e a conversão de energia luminosa em energia química. Quando a fotossíntese excede a respiração, o carbono passa a ficar estocado nos ecossistemas e sua concentração na atmosfera diminui. A capacidade de estocagem dos ecossistemas florestais varia de acordo com características dos vegetais (idade e composição das espécies) e do meio (clima e solo) (BROWN; LUGO, 1990). Alguns trabalhos indicam que espécies pioneiras apresentam capacidade de estocagem de carbono menor que as espécies de outros grupos ecológicos (AGUIAR; GAMA; BELDINI, 2017; LAURANCE, 1997). Também é possível observar que a mudança no uso da terra modifica a capacidade de sequestro de carbono dos ecossistemas florestais (FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ et al., 2019).

Nas florestas tropicais a estimativa do estoque de carbono ainda é muito incerto, devido à grande variedade ambiental e pela maioria dos estudos utilizarem apenas dados de vegetação lenhosa com DAP > 10 cm (SRINIVAS;

SUNDARAPANDIAN, 2019). Entretanto, é importante destacar que os indivíduos com DAP <10 cm que normalmente são subestimados, apresentam crescimento mais rápido e representam uma significativa porção da biomassa acima do solo (CHATURVEDI; RAGHUBANSHI; SINGH, 2012).

O estoque de carbono está diretamente ligado a características da vegetação presente no local, por certo, influenciado pelos impactos da mudança de uso da terra. Em florestas tropicais, a quantidade de carbono acima do solo pode chegar acima de 200 t C/ha, quase quatro vezes maior que a quantidade encontrada em florestas temperadas (DALAL; ALLEN, 2008). A dinâmica da biomassa em florestas secundárias está diretamente ligada à variação dos estágios sucessionais florestais atrelados ao crescimento, recrutamento e mortalidade, juntamente com os efeitos do clima (ROZENDAAL et al., 2017). Entretanto, a dinâmica de carbono em florestas secundárias ou em florestas primárias degradadas são elementos primordiais para o balanço regional de carbono (ARAGÃO et al., 2014).

Há diversas formas de estimar a quantidade de biomassa acima do solo ou carbono em uma floresta, alguns métodos por si acabam sendo destrutivos à alguns indivíduos para a medição com maior precisão. Os modelos alométricos fazem parte dos métodos mais difundidos para estimativa de biomassa por modelos de regressão, podendo incluir informações dendrométricas provenientes de inventários florestais como diâmetro a altura do peito, altura total da árvore e características específicas da madeira (JUCKER et al., 2017; NELSON et al., 1999). Entretanto, é importante o uso de tecnologia para otimizar as estimativas e aumentar a escala de estudo. Para isso, são utilizados também modelos com base em respostas espectrais que podem fornecer informações da estrutura da floresta por meio de sensoriamento remoto hiperespectral (LONGO et al., 2016)(FENG et al., 2017; LONGO et al., 2016; RAPPAPORT et al., 2018; SILVA et al., 2017).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Localização da área de estudo**

A área de estudo abrange diversas áreas que compreendem o Pará, localizado na Amazônia Legal (Figura 1). O primeiro deles está em Paragominas,

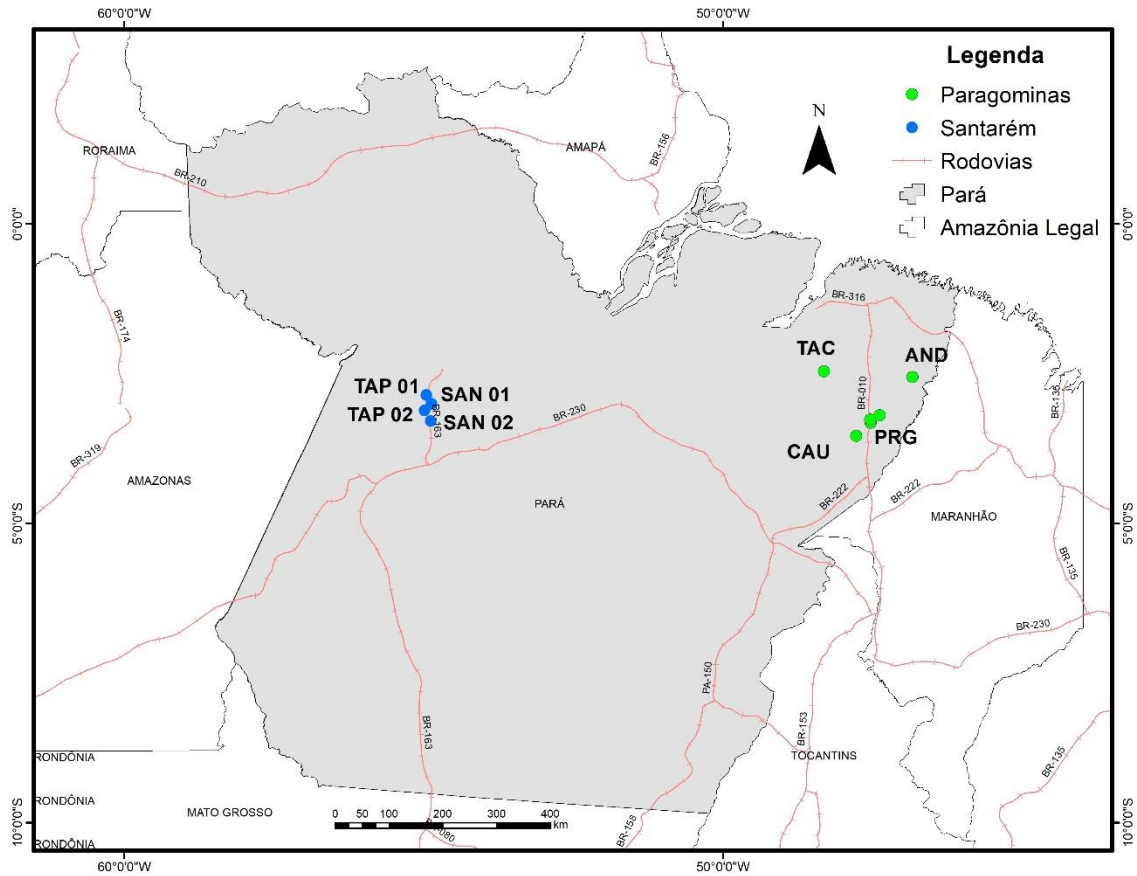
município pertencente à Amazônia oriental, uma região com grande atividade econômica madeireira com manejo florestal desde a década de 1960. Com o declínio da atividade madeireira, houve a expansão da fronteira agrícola, principalmente com monoculturas como a soja e as áreas de pastagens. A partir de 2008, o município adotou políticas de redução do impacto ambiental das atividades econômicas a qual gerou um declínio no desmatamento pela primeira vez na história do Pará (GUIMARÃES et al., 2011).

Segundo o relatório bienal do Programa Municípios Verdes 2013-2014 (WHATELY; CAMPANILI, 2013), os motivos da redução do desmatamento foram: (i) restrição ao crédito rural, (ii) lista de áreas embargadas, (iii) lista de municípios que mais desmatam na Amazônia em decorrência da imposição de diversas restrições administrativas destes municípios, (iv) responsabilização da cadeia produtiva da carne; e, por último, não menos importante, (v) fortalecimento das operações de fiscalização. Entretanto, em 2008 acerca de 45% da área do município já havia sido desflorestada (PINTO et al., 2009). A primeira área de estudo no município é a Fazenda Cauaxi (3° 45'S, 48° 29'W), uma área privada com histórico de manejo florestal de impacto reduzido (ASNER et al., 2004), seguidas por Fazenda Andiroba (2° 33'S, 46° 50'W), Fazenda Nova Neonita (3° 19'S, 47° 31'W) e Tomé Açu (2° 77'S, 48° 52'W).

Santarém foi o segundo município estudado, também com histórico de áreas com histórico de degradação, extração madeireira e ocupação antrópica. Os polígonos estudados nessa região possuem áreas consideradas como corredores ecológicos entre os limites da Floresta Nacional do Tapajós, porém, são encontradas áreas com usos anteriores como agricultura e pastagem.



**Figura 1.** Localização das parcelas na área de estudo



## 4.2 Mudança de uso da terra e floresta secundária

Para este estudo, utilizou-se dados oriundos do projeto TerraClass para os anos de 2000, 2004, 2008, 2010, 2012, 2014. Com dos dados obtidos, foram gerados mapas de uso da terra para todos os anos, utilizando as próprias classes temáticas do Projeto (tabela 1). Os dados são derivados de imagens de média resolução Landsat-5 TM e MODIS por meio de classificação supervisionada (ALMEIDA et al., 2016; COUTINHO et al., 2013).

Tabela 1. Principais classes de uso e cobertura da terra

----- Classes -----	----- Definição -----
Projeto TerraClass	
<b>1. Floresta Primária</b>	Formação vegetal natural caracterizada pelo adensamento de espécies arbóreas que não tenham sofrido supressão total da vegetação original, desde o início do monitoramento do desmatamento da Amazônia.
<b>2. Floresta Secundária</b>	Formação vegetal natural em processo de regeneração, caracterizada pelo adensamento de espécies arbóreas, que já tenha sofrido supressão total da vegetação original, desde o início do monitoramento do desmatamento da Amazônia.
<b>3. Cultura Agrícola Perene</b>	Culturas agrícolas permanentes, apresentando diferentes estágios de maturidade e cobertura vegetal, como plantações de café, citros, seringueira, entre outras.
<b>4. Cultura Agrícola Temporária</b>	Culturas agrícolas que apresentam um ou mais ciclos de reprodução no ano-safra de referência do mapeamento, como soja, milho, algodão, entre outras.
<b>5. Pastagem Cultivada Arbustiva</b>	Pastagem com predomínio de vegetação lenhosa, composta por espécies arbustivas/arbóreas, além das espécies herbáceas cultivadas.
<b>6. Pastagem Cultivada Herbácea</b>	Pastagens com predomínio de vegetação forrageira herbácea composta por espécies cultivadas.
<b>7. Silvicultura</b>	Culturas de espécies florestais de interesse comercial, representadas por formações arbóreas monoespecíficas, como eucalipto e pinus.
<b>8. Área Urbanizada</b>	Áreas urbanas ou de influência urbana, como lugarejos, vilas, cidades, ou regiões metropolitanas, apresentando arruamentos e infraestruturas residencial e industrial.
<b>9. Não observado</b>	Áreas não mapeadas em função da presença de nuvens, sombra de nuvens ou queimadas nas imagens de satélite utilizadas.
<b>10. Outros</b>	Áreas que não se enquadram nas demais classes temáticas, tais como afloramentos rochosos, praias fluviais, banco de areia, entre outras.

Fonte: (ALMEIDA et al., 2016)

Os dados de uso da terra foram importados para a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) em formato matricial para as devidas correções de deslocamento e análise dos dados. Devido um deslocamento quando sobrepostos os *rasters* de 2000 com os demais anos, foi feita uma correção de 200 metros pela própria plataforma fazendo o registro e correção do deslocamento para que todas as imagens estejam na mesma posição.

Por meio da plataforma GEE foram também gerados os *rasters* para as classes de idades das florestas secundárias baseadas no uso anterior da terra. Para gerar essa tabela, foram gerados dois *rasters* por ano, um sem a classe de floresta secundária e outro apenas com floresta secundária. Com estes dois *rasters* por ano, realizou-se a modelagem cartográfica (TOMLIN, 1990) para verificar por pixel (30 metros) o intervalo de idade de cada floresta secundária classificada pelo projeto TerraClass pela diferença do intervalo de idade de cada ano estudado, atribuindo a cada intervalo uma classe que pode variar de 1 a 6.

Utilizou-se a seguinte equação para obter os mapas de cada idade sem as áreas de nuvens (classe “não observado”) Idade de floresta secundária =  $FS_x * 1 + FS_x * 2 + FS_x * 3 + FS_4 * 4 + FS_5 * 5 + FS_6 * 6$ , onde  $FS_x$  = Floresta secundária com a respectiva classe de idade e o multiplicador determinante para cada classe de idade. Após o processamento dos *rasters*, os dados foram exportados em forma de tabela (tabela 2), para análise estatística dos dados.

Tabela 2. Classificação da idade de Florestas Secundárias em intervalos de classe

Intervalo de Idade (anos)	Classe	2000	2004	2008	2010	2012	2014
0 a 2	1	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Floresta Secundária
2 a 4	2	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Floresta Secundária	Floresta Secundária
4 a 6	3	Uso anterior	Uso anterior	Uso anterior	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária
6 a 10	4	Uso anterior	Uso anterior	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária
10 a 14	5	Uso anterior	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária
> 14	6	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária	Floresta Secundária

### 4.3 Análise da distribuição espacial das florestas secundárias

A influência geopolítica de contextos locais de uso de recursos florestais e mudança do uso da terra no processo de regeneração e distribuição de florestas secundárias foi analisada a partir da variação da distribuição espacial

da ocorrência e do tamanho dos fragmentos mapeados pelo TerraClass em cada município do Estado. A variação da distribuição espacial foi analisada pela estatística Getis-Ord  $G_i^*$ , que associa o valor de um atributo de cada feição com relação os valores de feições vizinhas mapeando locais com valores estatisticamente superiores (*Hot spot*) ou inferiores (*Cold spot*) em relação ao valor esperado do atributo para área total analisada (MITCHELL, 2005). A estatística Getis-Ord  $G_i^*$  analisa se existem valores de feições (pontos, linhas ou polígonos) espacialmente agrupados, demonstrando relacionamento ou dependência espacial entre os valores e a localização geográfica (distância). Essa estatística testa a hipótese nula (completa aleatoriedade espacial – CSE) de que valores das feições são aleatoriamente distribuídos em um determinado espaço e calcula z-escores e p-valores considerando a distribuição normal padrão. O z-escore é o número de desvios padrões em relação à média e revela a magnitude da variação dos valores dos agrupamentos espaciais. O p-valor é a probabilidade de o padrão observado ser resultado de algum processo aleatório. Os z-escores e p-valores representam a significância estatística de agrupamentos espaciais de valores.

A estatística Getis-Ord  $G_i^*$  foi implementada em ambiente de sistema de informações geográficas (SIG) no programa ArcGIS versão 10.5, utilizando o algoritmo *Hot Spot Analysis (Getis-Ord  $G_i^*$ )*. Considerando a ocorrência (localização geográfica) e o tamanho dos fragmentos em relação aos municípios e à área do estado do Pará. As florestas secundárias de cada classe de idade em formato *raster* (formato *.tiff*) com resolução espacial de 30 m foram convertidas para feições vetoriais de polígonos (formato *shapefile*) para possibilitar o cálculo de áreas em hectares (*Calculate geometry*) de cada fragmento com base no sistema de coordenadas projetadas *South America Albers Equal Area Conic*. Os polígonos foram convertidos para feições vetoriais de pontos (centróide da área) e a cada ponto foi atribuído a área de seu respectivo polígono. Esse arquivo digital de pontos foi utilizado como arquivo de entrada na primeira análise *Hot Spot*, que considerou a incidência (densidade de pontos) e tamanho de florestas (ha). Em seguida, os polígonos do arquivo digital dos fragmentos de cada classes de idade foram subdivididos (*Intersect*) com base nos limites dos municípios do estado e suas áreas foram recalculadas.

Utilizando a operação *Spatial Join*, a soma das áreas dos fragmentos foi atribuída a cada município, bem como a contagem do número de polígonos as classes de idade de florestas secundárias em conjunto. Utilizando os dois atributos de incidência (número de fragmentos florestas) e tamanho total (ha) dos municípios, a segunda análise da estatística Getis-Ord  $G_i^*$  foi executada, considerando possíveis agrupamentos geopolíticos de acordo com os limites dos municípios do estado.

Na *Hot Spot* que considerou o arquivo de entrada de pontos, a banda ou limite de busca de valores vizinhos foi calculada com a ferramenta *Calculate Distance Band from Neighbor Count*, que reportou o valor de 95,99 km, sendo essa a distância euclidiana para consultar valores de, no mínimo, 30 pontos vizinhos de florestas secundárias no Pará. Na análise da incidência e tamanhos dos fragmentos utilizando o arquivo dos municípios, a distância de busca utilizado foi calculada de forma que, no mínimo, os valores de todos os municípios contíguos a um específico município pudessem ser contabilizados na estatística Getis-Ord  $G_i^*$ , tirando o efeito do tamanho do município. Utilizou-se o método de distância euclidiana considerando o relacionamento espacial de bordas e vértices (*Contiguity\_Edges\_Corners*). O algoritmo retornou ao fim da análise z-escores e p-valores com níveis de confiança de 90, 95 e 99% por localização espacial no mapa.

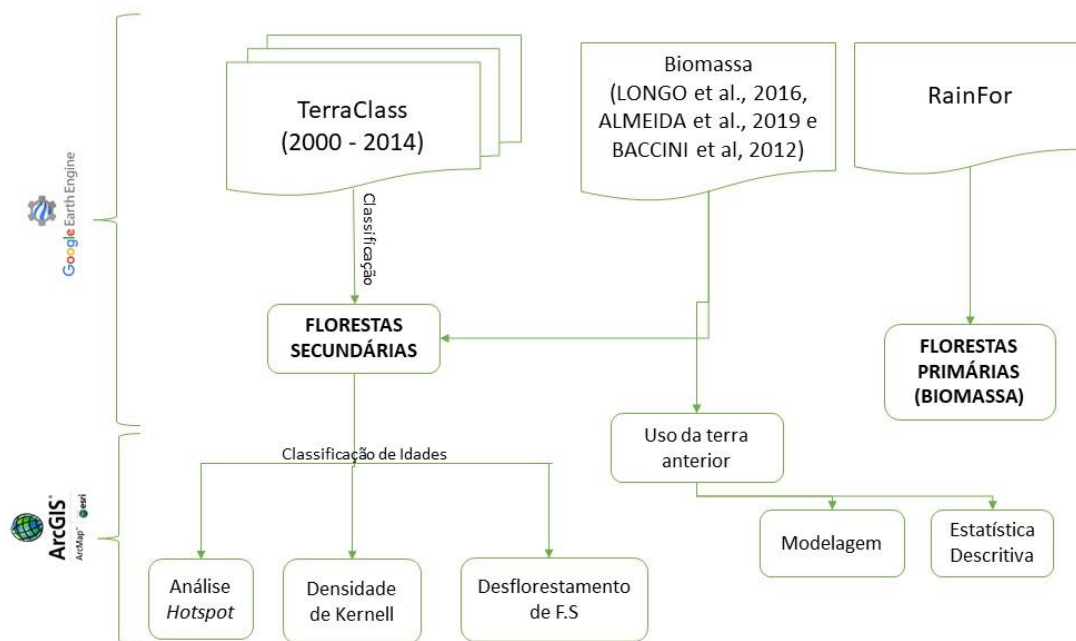
A densidade de kernel foi também implementada em ambiente de sistema de informações geográficas (SIG) utilizando o algoritmo *Kernel Density*. Para entrada no algoritmo foram utilizados dados vetoriais dos polígonos de florestas secundárias presentes no ano de 2014 e os dados vetoriais do desmatamento acumulado de florestas secundárias entre 2000 e 2014. O algoritmo calcula a magnitude por unidade de área de um ponto ou um polígono usando a função de kernel para calcular a densidade dos vizinhos mais próximos ao ponto ou polígono (SILVERMAN, 1986). No campo de população, utilizou-se o número de polígonos próximos para calcular a densidade levando em consideração a presença ou ausência de floresta secundária e desmatamento de floresta secundária. O algoritmo retorna um arquivo matricial agrupando classes de densidades de acordo com os quartis da distribuição dos dados de forma espacial no mapa.

A metodologia utilizada consiste na utilização de três bases de dados diferentes de biomassa dados de uso da terra (TerraClass) e dados de biomassa do grupo RainFor. O geoprocessamento dos dados será feito em dois locais distintos como mostrado na Figura 2.

#### 4.4 Análise do balanço de áreas em florestas secundárias no Pará

A metodologia utilizada consistiu na utilização de três bases livres de dados diferentes de biomassa (ALMEIDA et al., 2019; BACCINI et al., 2012; LONGO et al., 2016), dados de uso da terra (TerraClass) e dados de biomassa do grupo RainFor. O geoprocessamento dos dados foi feito em dois locais distintos como mostrado na Figura 2.

**Figura 2.** Classificação da metodologia utilizada



A primeira base de dados de biomassa aérea consistiu em dados obtidos por meio de um artigo já publicado e cedidos para esta pesquisa (LONGO et al., 2016). Essa estimativa de biomassa foi obtida por meio da densidade total de carbono em biomassa acima do solo (ABCD: Aboveground Carbon Density) baseada em campanhas de coletas de dados por LiDAR aéreo. Os dados

recobriram áreas pré-definidas entre os anos de 2012 e 2015, utilizando em 2012 o equipamento ALTM 3100 (Optech Inc.), em 2013 e 2014 o ALTM Orion M-200 e, em 2015, o ALTM Orion-M300.

Após a coleta de dados, somadas aos inventários florestais obtidos em campo nas áreas de estudo, utilizou-se o modelo paramétrico  $ABCD_{ALS} = 0,058(0,023) e^{-3,6(1,3) f_{1-2,5}} k_h^{0,72(0,11)} h_5^{0,16(0,04)} h_{10}^{-0,43(0,06)} h_{75}^{2,41(0,11)} h_{100}^{-0,61(0,12)} + E_{\mathcal{N}}[\mu = 0, \sigma = 0,85(0,12) ABCD_{ALS}^{0,62(0,06)}]$ , (1)

onde  $f_{1-2,5}$  é a fração de retorno entre 1,0 e 2,5m  $h$  é a média de retorno de altura,  $k_h$  é a curtose da distribuição de todos os retornos de altura dentro do limite da plotagem,  $h_5$  e  $h_{10}$  são o 5° e 10° percentis de todos os retornos de altura e  $h_{100}$  é a máxima altura;  $E_{\mathcal{N}}$  é a distribuição heterocedástica prevista dos resíduos. As variáveis selecionadas pelo método de seleção do subconjunto de regressão descrevem a distribuição da nuvem de pontos em diferentes estratos ( $h_5, h_{10}, \bar{h}, h_{100}$ ) e também a forma geral da distribuição ( $k_h$ ), indicando que a estrutura da floresta abaixo do dossel também é relevante para quantificar a variabilidade na ABCD. Os dados do LiDAR e do inventário florestal utilizados para calibrar o modelo foram obtidos pelo projeto *Sustainable Landscapes Brazil*, apoiado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pelo Serviço Florestal dos EUA, USAID e pelo Departamento de Estado dos EUA.

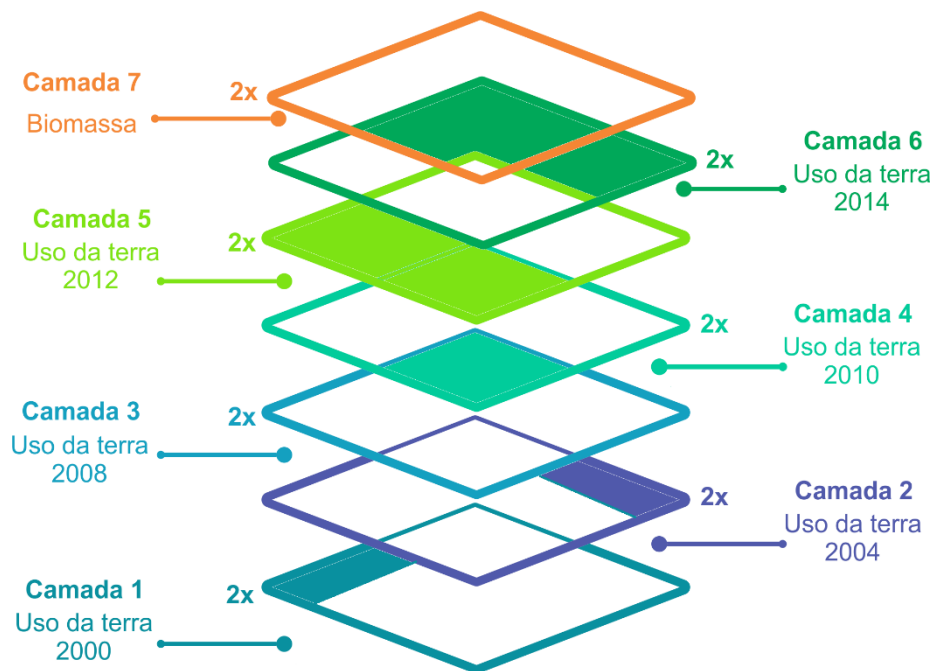
A segunda base de dados foi produzida pelo projeto Monitoramento Ambiental por Satélite no Bioma Amazônia (MSA), subprojeto 7 (Melhoria dos métodos de estimativa de biomassa e de modelos de estimativa de emissões por mudança de uso da terra), com apoio do Fundo Amazônia e recursos do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDS), também cedida para esta pesquisa. A estimativa de biomassa foi obtida por meio da combinação de LiDAR e imagens hiperespectrais por meio de modelos alométricos utilizando métricas de ambos os métodos de obtenção de dados com resolução espacial de 50m (ALMEIDA et al., 2019).

A terceira base de dados utilizada encontra-se disponível para livre acesso na plataforma Google Earth Engine, que consiste em um artigo científico com estimativa de emissão de dióxido de carbono por meio de mapas de densidade de carbono (BACCINI et al., 2012) de 500 m de resolução espacial.

Nesta base de dados, o produto é resultante de uma combinação de LiDAR com uma imagem multiespectral de reflectância da superfície para as regiões tropicais da África, América e Ásia.

Estes dados foram transformados em *raster* para o processamento em nuvem na plataforma GEE. O *raster* de biomassa foi sobreposto às camadas de uso da terra para extrair de anos estáticos a biomassa referente ao intervalo de idade da floresta secundária oriundas de diferentes usos da terra por pixel (Figura 3). Então, a partir destes dados gerou-se um novo *raster* contendo dados de biomassa por classe de idade em cada pixel classificado.

**Figura 3.** Representação do processamento dos dados espaciais



Essas três bases de dados foram utilizadas sobrepondo dados do TerraClass para obter as respectivas biomassas de cada metodologia em mesmas áreas de florestas secundária no Pará. Para estimar a biomassa para florestas maduras, utilizou-se como parâmetro de comparação os dados utilizando dados do projeto RainFor, por meio da equação de biomassa proposta por Chave et al., (2005) e Feldpausch et al., (2012), nas quais utilizam variáveis dendrométricas acima do solo excluindo árvores mortas. Os dados de biomassa em florestas maduras partiram de localidades próximas das parcelas em estudo (parcelas: FEC-01, RFH-01, RFH-05 PGR-01, PGR-02, PGR-03, PGR-04, PGR-05, PGR-06, PGR-07, PGR-08, PGR-09, PGR-10, PGR-11, PGR-12, STT-01,



STT-02, STT-03, STT-05, STL-01, STL-02, STL-03, STL-04, STL-05, STL-06, STL-07, STL-08, STL-09, STL-10, STL-11, STL-12) sempre no mesmo município de estudo com o objetivo encontrar áreas com menores diferenças topográficas e climáticas que podem haver entre as áreas.

#### 4.5 Modelagem da biomassa pelo uso anterior da terra

Dados do uso anterior da terra foram tabulados pelo rastreamento da transição de cada classe no ano n-1 da classe de floresta secundária mapeada pelo TerraClass. No ano inicial (2000), considerou-se as florestas maduras como a classe que antecede as florestas secundárias e, para os seguintes anos, foi considerado a observação anterior como rastreamento. Estes dados foram cruzados com as informações da quantidade de biomassa presente no pixel analisado e utilizadas no modelo estatístico não linear de crescimento (2) que consideram variáveis biológicas (CHAPMAN, 1961; RICHARDS, 1959).

$$Biomassa (MgC^{-1}) = A (1 - e^{-B*Idade})^C \quad (2)$$

onde, A = Valor assintótico; B = ponto de inflexão, e; C = Forma.

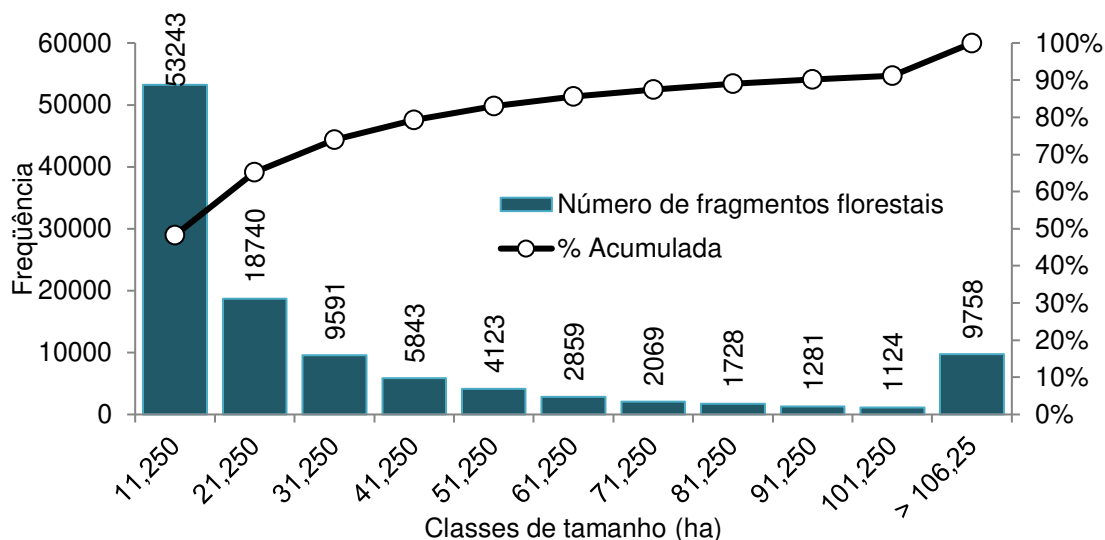
O ajuste do modelo foi realizado com o auxílio da ferramenta de suplemento *solver* no Excel 2016. Como parâmetro de restrição no ajuste adotou-se  $A \geq 0$ . Para cada classe de uso anterior à floresta secundária foi ajustado o modelo de predição de biomassa. Os dados de idade para alimentar o modelo foram reajustados para tentar encontrar intervalos no centro de classe de acordo com a literatura como: 1, 2, 5, 8, 12, 37 e 1500 anos. Após a entrada dos dados e o ajuste do modelo foram geradas as curvas de acúmulo de biomassa com o passar dos anos utilizando as classes de idade supracitadas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como primeiro resultado, observa-se a distribuição dos tamanhos dos fragmentos de florestas secundárias mapeados entre 2000 e 2014 onde há maior concentração dos dados nas classes de tamanhos menores entre 6,25 a 26,25 hectares (Figura 4). Na estatística descritiva, foram mapeados 110.359 fragmentos florestais com média de 55,61 ha  $\pm$  402,89 ha, mediana de 16,98ha,

moda de 6,25ha e somatório de 6,138076 milhões de ha (tabela 3). Esses resultados mostraram a importância do estudo das florestas secundárias em regiões sob forte ação do desmatamento o que corrobora com a discussão proposta por PERZ & SKOLE (2003) onde já é possível encontrar áreas que são encontradas maiores coberturas de florestas secundárias do que áreas desflorestadas sem uso da terra. Em outras palavras, foi possível que em algum momento as áreas de florestas secundárias cresçam mais do que áreas já desflorestadas, o que pode ser um aspecto positivo quando visto do ponto de mitigação dos danos já causados o que não necessariamente significa que há uma recuperação consistente no ecossistema (FEARNSIDE, 1996).

**Figura 4.** Distribuição dos tamanhos das florestas secundárias maiores que 6,25ha mapeadas entre 2000 e 2014.

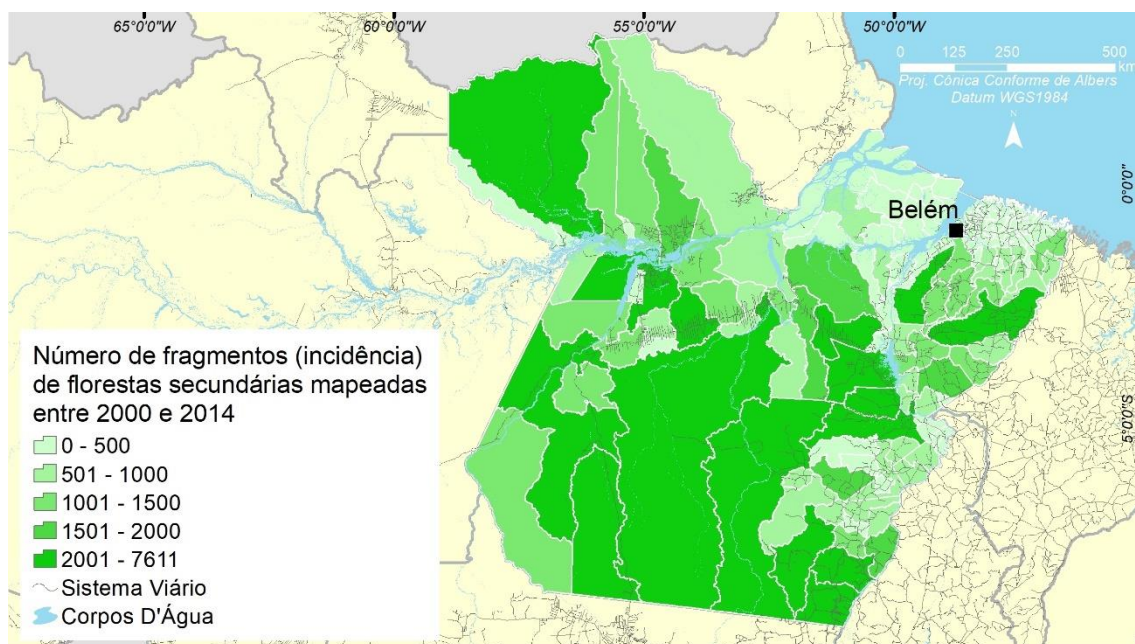


**Tabela 3.** Estatística descritiva dos fragmentos (>6,25 ha) de Florestas Secundárias mapeadas entre 2000 e 2014

Área (ha)	
MÉDIA	55,61917
MEDIANA	16,98688
DESVIO PADRÃO	402,8946
AMPLITUDE	65.776,65
MÍNIMO	6,250007
MÁXIMO	65.782,9
SOMA	6138076
INCIDÊNCIA (N)	110.359

A Figura 5 demonstra a distribuição dos fragmentos de florestas secundárias entre os anos de 2000 e 2014 no Pará por limite municipal. Observou-se que, predominantemente, na região sul do Pará em municípios com áreas maiores, houve uma maior concentração na incidência de florestas secundárias nestes municípios. Este fato pode ser justificado pelo próprio desmatamento de florestas maduras na região. Áreas que sofreram maiores desmatamentos em quantidades absolutas deram espaço para a maiores mudanças de uso e cobertura da terra.

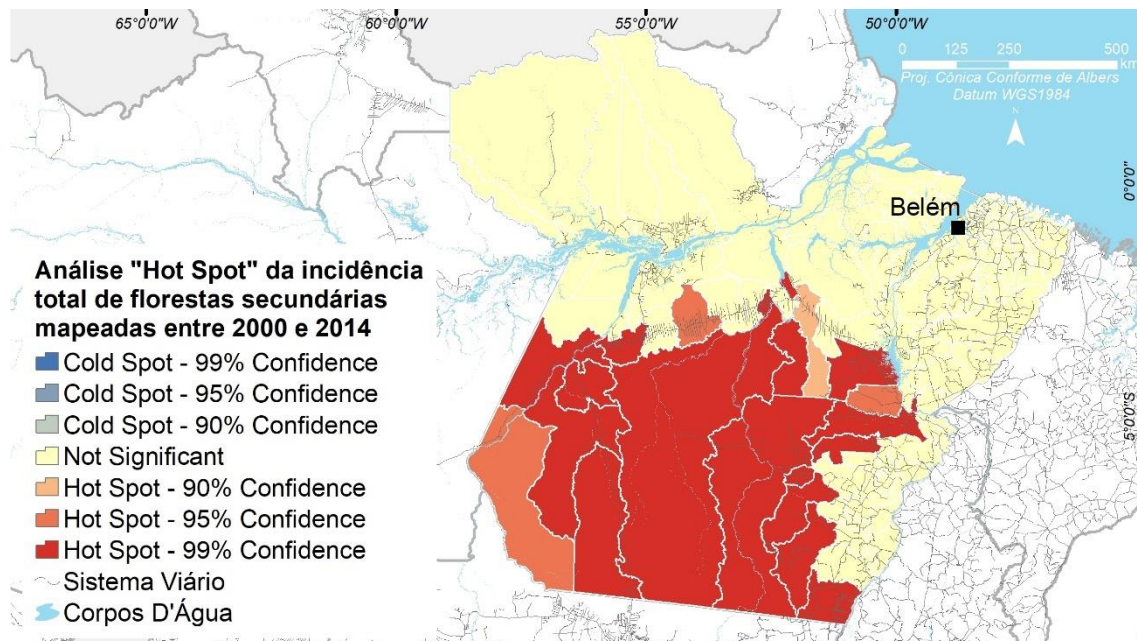
**Figura 5.** Incidência de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



Utilizando a análise *hot spot*, verificou-se a diferença estatística na incidência total de florestas secundárias no período estudado (Figura 6) entre os municípios do estado. Constatou-se que a região sul do Pará apresentou, em geral, probabilidade acima de 90% de incidência de florestas secundárias. A justificativa deste fato pode-se dar pelo tamanho de áreas desmatadas nessas

regiões que costumam ter impactos severos de grandes projetos de supressão florestal, como a mineração.

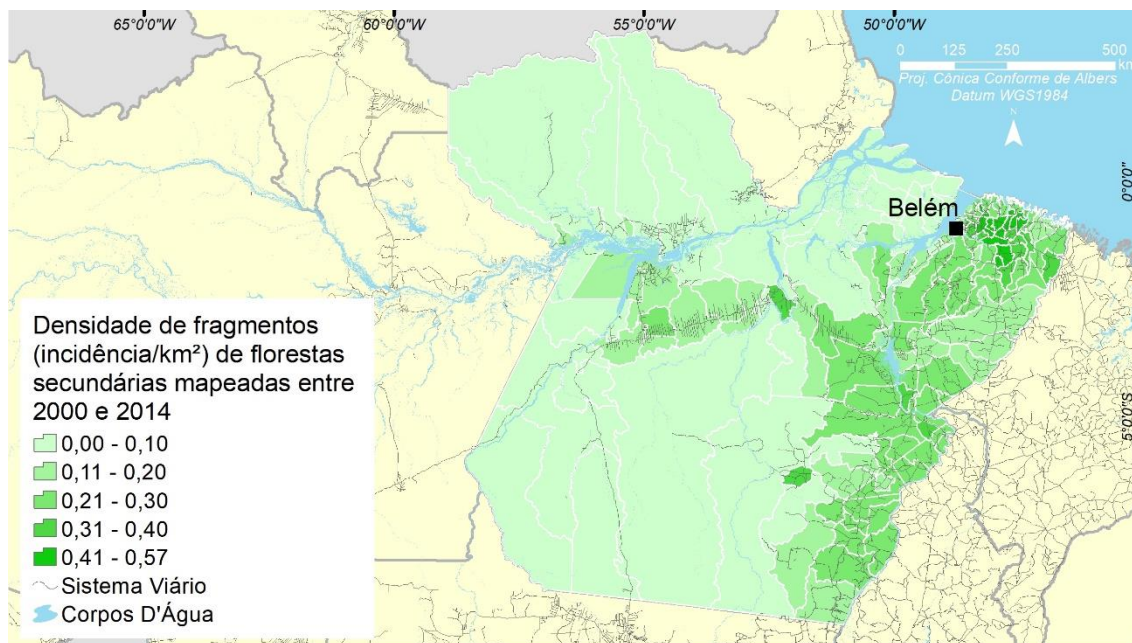
**Figura 6.** Análise "hot spot" da incidência total de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



Visto o surgimento destas florestas secundárias no estado do Pará, calculou-se a densidade de fragmentos (incidência/km<sup>2</sup>) de florestas secundárias mapeadas no mesmo período (Figura 7). Observou-se que a região leste do Pará apresentou maiores densidades de fragmentos em função da alta intensidade de mudança de uso e cobertura da terra aliadas com a urbanização. Com a construção do complexo formado pelas políticas de desenvolvimento da região, como a construção e expansão da rodovia Belém-Brasília, a hidrelétrica de Tucuruí e o Projeto Grande Carajás, houve uma grande expansão na densidade populacional nessas regiões (CARVALHO, 2001). Observou-se que a densidade

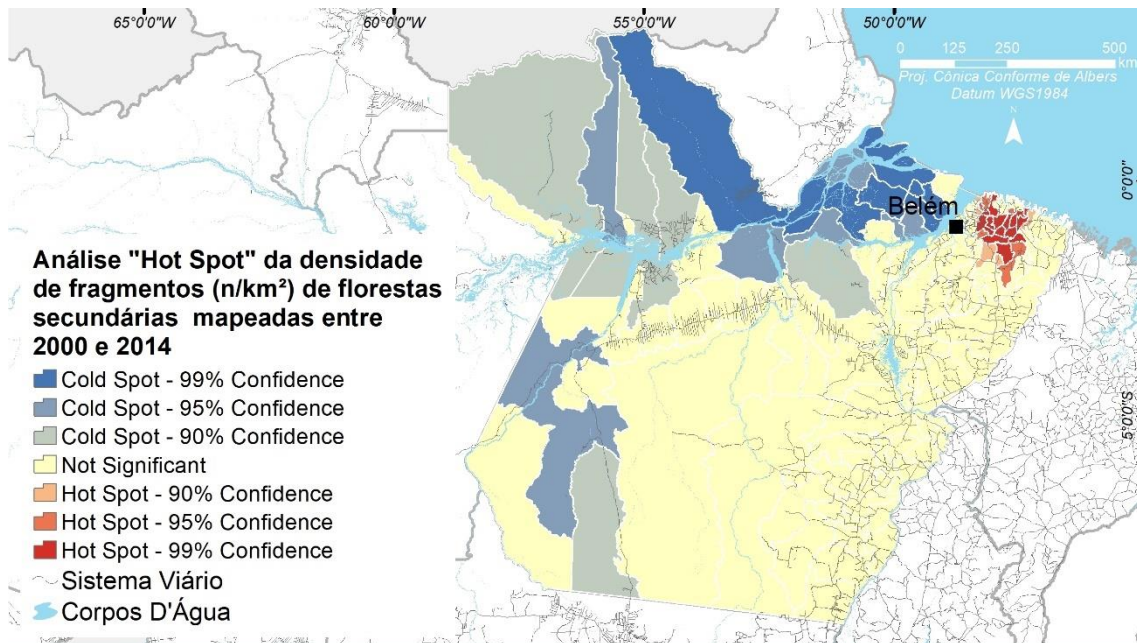
de fragmentos foi maior nas regiões cortadas pela rodovia transamazônica e outras rodovias de grande fluxo de pessoas.

**Figura 7.** Densidade de fragmentos (incidência/km<sup>2</sup>) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



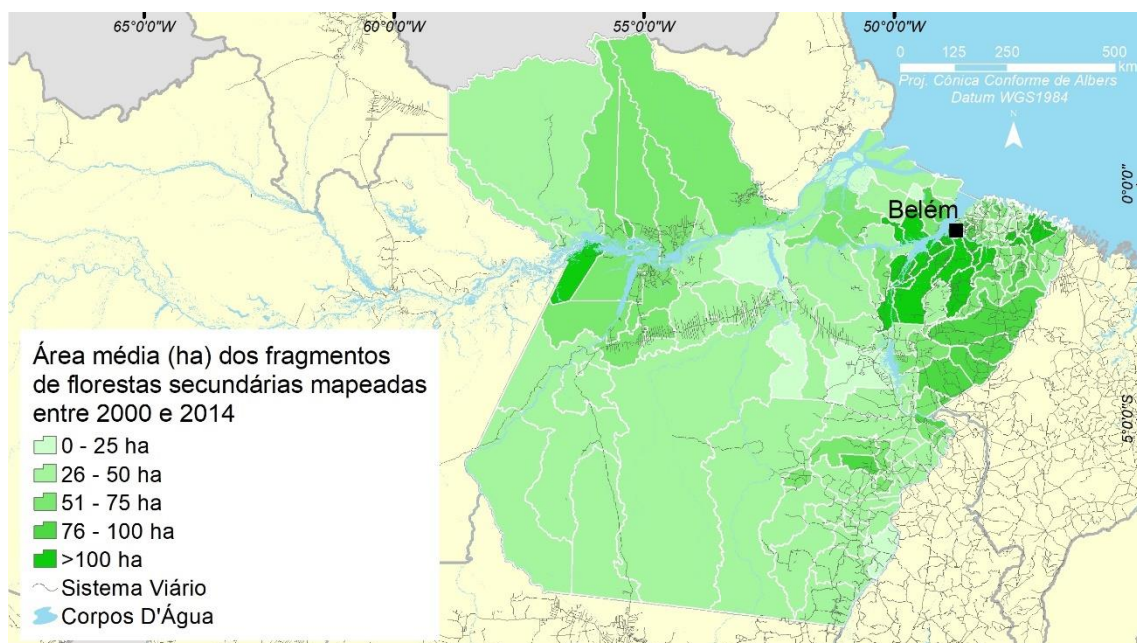
Então, foi testado estatisticamente se houve diferença na densidade de fragmentos (n/km<sup>2</sup>) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014 (Figura 8). Observou-se que houveram municípios mais ao norte do estado classificados como *cold spots*, ou seja, a probabilidade de ocorrência deste evento nestes municípios foi abaixo da média esperada para o estado, virtualmente certo de não ser provocado por um processo aleatório. Os municípios mais populosos como a região periurbana de Belém apresentaram maior probabilidade de ocorrência do evento por se encontrarem em regiões classificadas como *hot spots*.

**Figura 8.** Análise "hot spot" da densidade de fragmentos de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



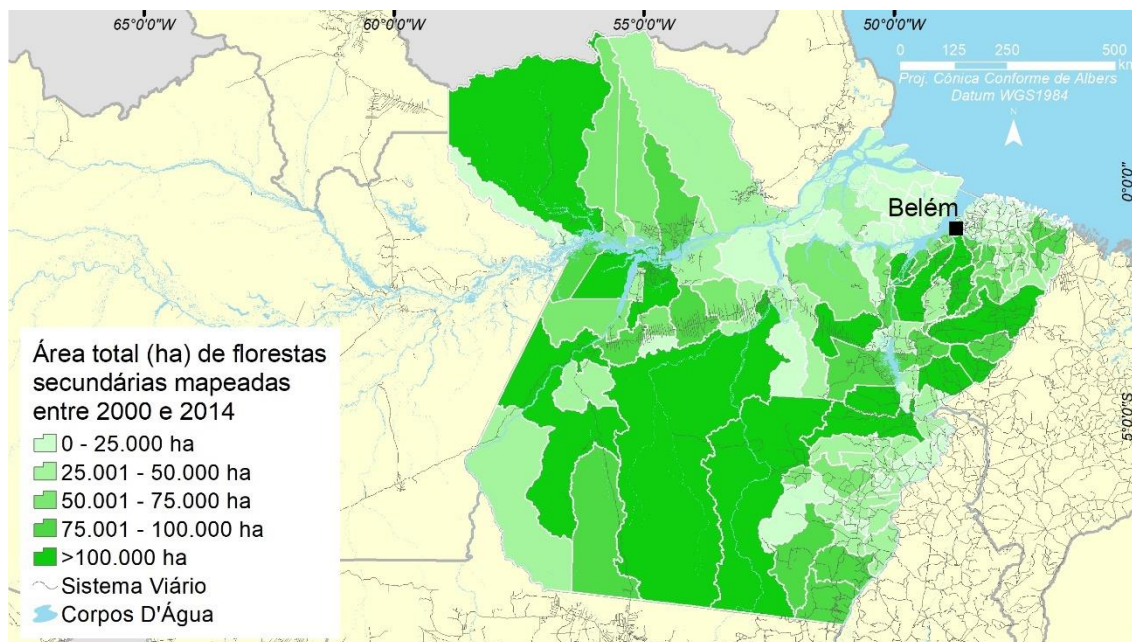
Verificou-se, então, o tamanho médio dos fragmentos nos municípios e sua distribuição. Segundo a Figura 9, a região nordeste do Pará apresentou em média, fragmentos maiores de florestas secundárias acima de 51 ha. A região sul e sudeste apresentou fragmentos menores que 25 ha em média.

**Figura 9.** Área média (ha) dos fragmentos de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



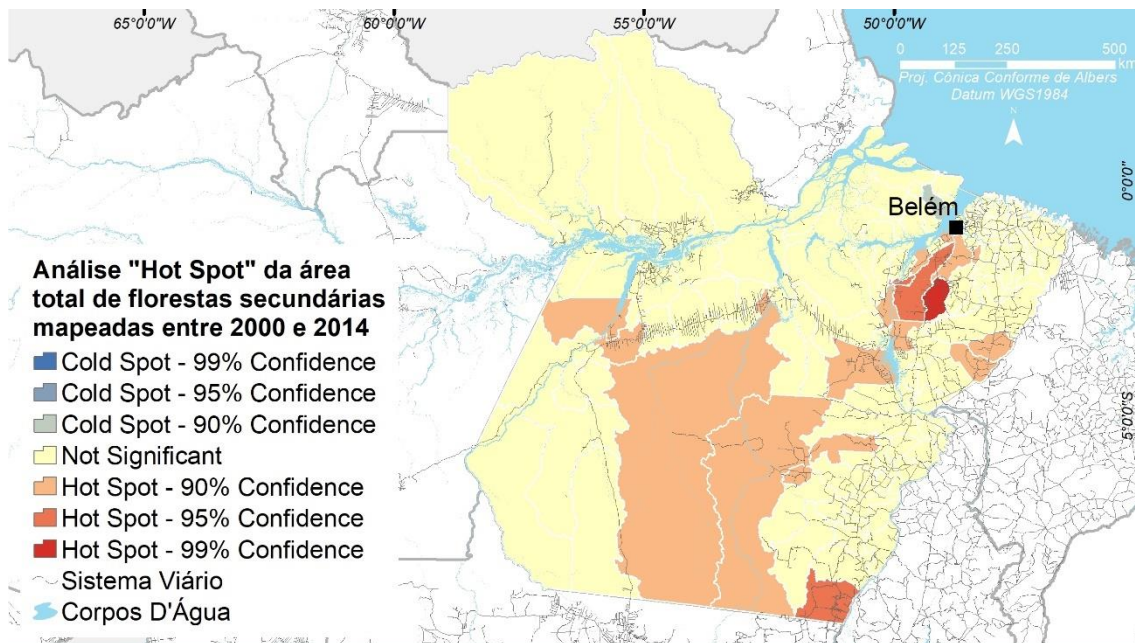
Em valores absolutos ou acumulados, houve uma grande distribuição da área total de florestas secundárias mapeadas no período em estudo (Figura 10). Municípios com grandes influências de projetos de mineração no estado apresentaram áreas com maior quantidade (soma) de florestas secundárias.

**Figura 10.** Área total (ha) de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



Em termos gerais, quando se leva em consideração a área total de floresta secundária no Estado, é inerente relacionar com os maiores municípios que também desmataram mais em valores absolutos como Altamira. Porém, como observado anteriormente, estes municípios apresentaram grande fragmentação de florestas secundárias. Este fato se deu pelas sucessivas mudanças de uso e cobertura da terra com o passar dos anos, gerando um verdadeiro mosaico de fragmentos florestais na região. Por meio da análise *hot spot* (Figura 11), verificou-se que os municípios com áreas maiores em geral e que já desmataram mais florestas maduras possuem a probabilidade acima de 90% de que estes eventos em grandes escalas não sejam aleatórios no espaço.

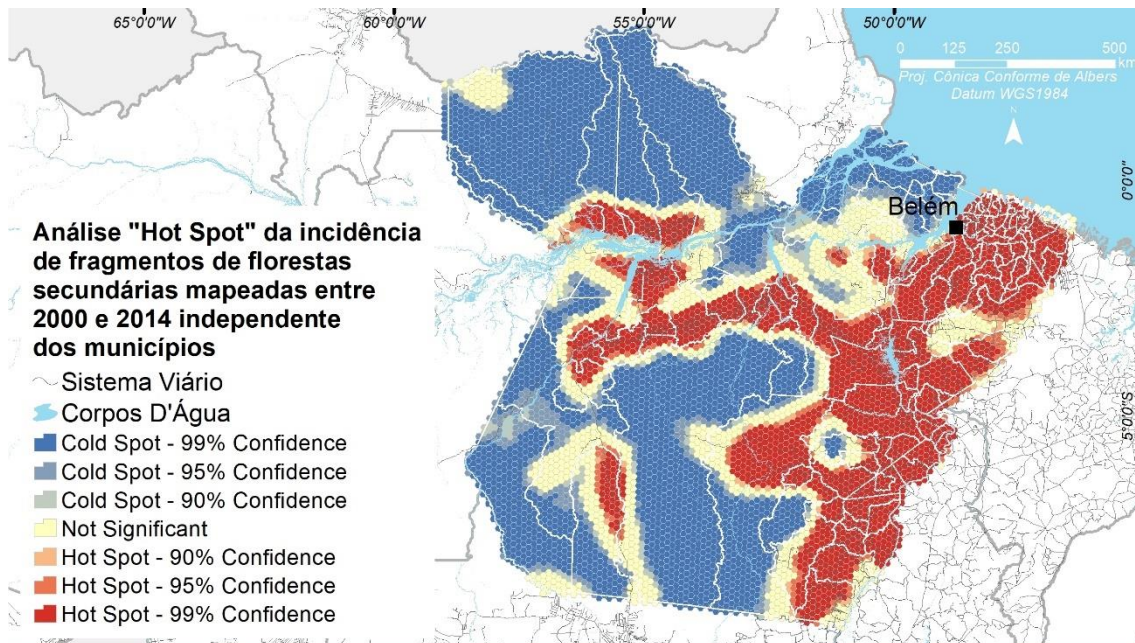
**Figura 11.** Análise "hot spot" da área total de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



Áreas que já sofreram forte ação do desmatamento de florestas maduras foram mais suscetíveis a incidência de florestas secundárias. Estes eventos não se deram de forma aleatória no espaço, como demonstra a Figura 12. Observou-se nitidamente que a probabilidade de que estes eventos não ocorram de forma aleatória no Estado (>90% de confiança), ou que isso acontece por efeitos geopolíticos locais. As regiões com forte influência das políticas de desenvolvimento da Amazônia, principalmente aplicadas a partir da década de 1960, são nitidamente verificadas em vermelho (*hot spot*) no Pará.



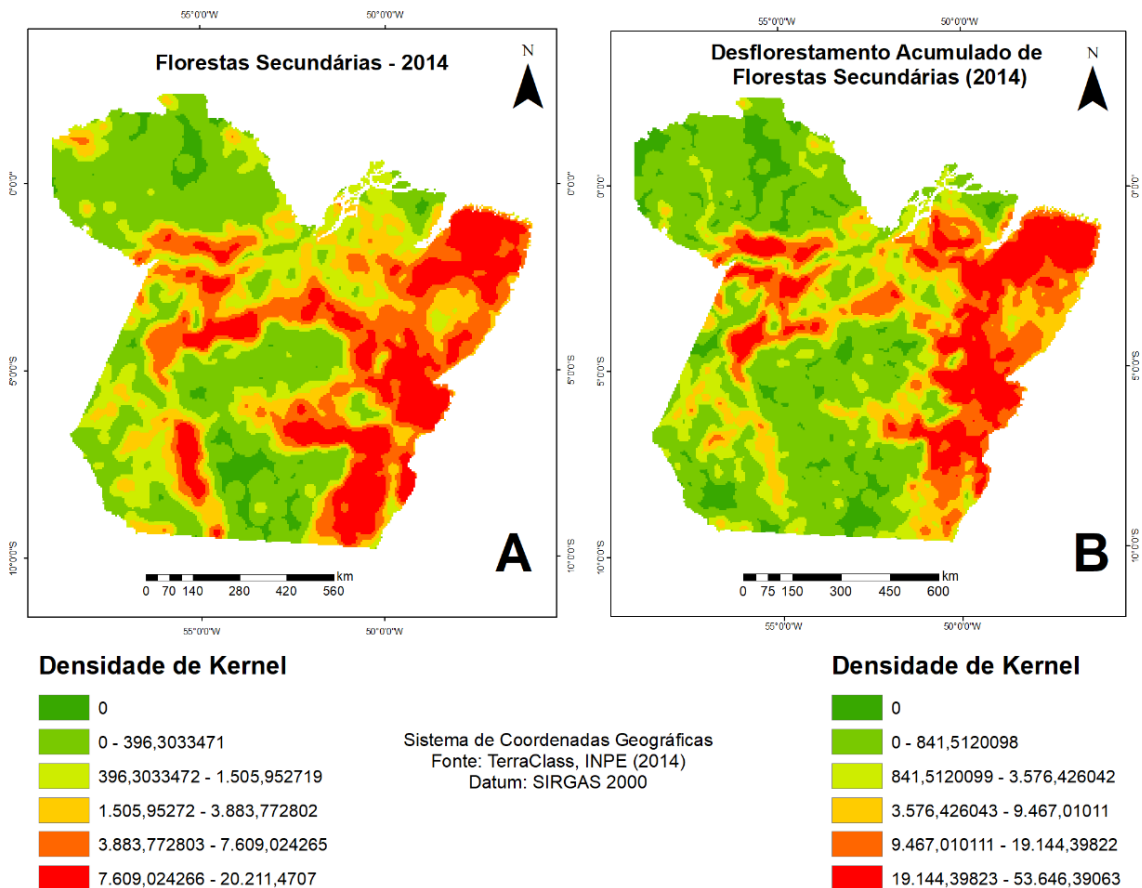
**Figura 12.** Análise "hot spot" da incidência de florestas secundárias mapeadas entre 2000 e 2014



Estas regiões foram fortemente correlacionadas às rotas terrestres de escoamento da produção do setor madeireiro, pecuário e de mineração e as rotas fluviais. Neste aspecto é importante entender que a dinâmica do surgimento das florestas secundárias depende de um desmatamento prévio de floresta madura em um primeiro momento. Porém, as florestas secundárias também podem surgir de outros tipos de uso da terra como as áreas de pastagem. Portanto, a incidência de florestas secundárias não ocorreu de forma aleatória no espaço e possuem grande importância na mitigação dos impactos das mudanças de uso da terra no estado do Pará.

Como produto da análise de densidade de kernel, observou-se o comportamento das florestas secundárias no ano de 2014 onde houve maior densidade de polígonos de florestas secundárias nas regiões mais antropizadas e com densidade populacional maior em todo o leste do estado do Pará. Foi possível observar que as florestas secundárias também tiveram concentração na região do Tapajós e Santarém (Figura 13). Também, áreas de desmatamento de florestas secundárias estiveram mais concentradas no nordeste paraense, mais precisamente em municípios que já sofreram grande perda de florestas primárias como Paragominas.

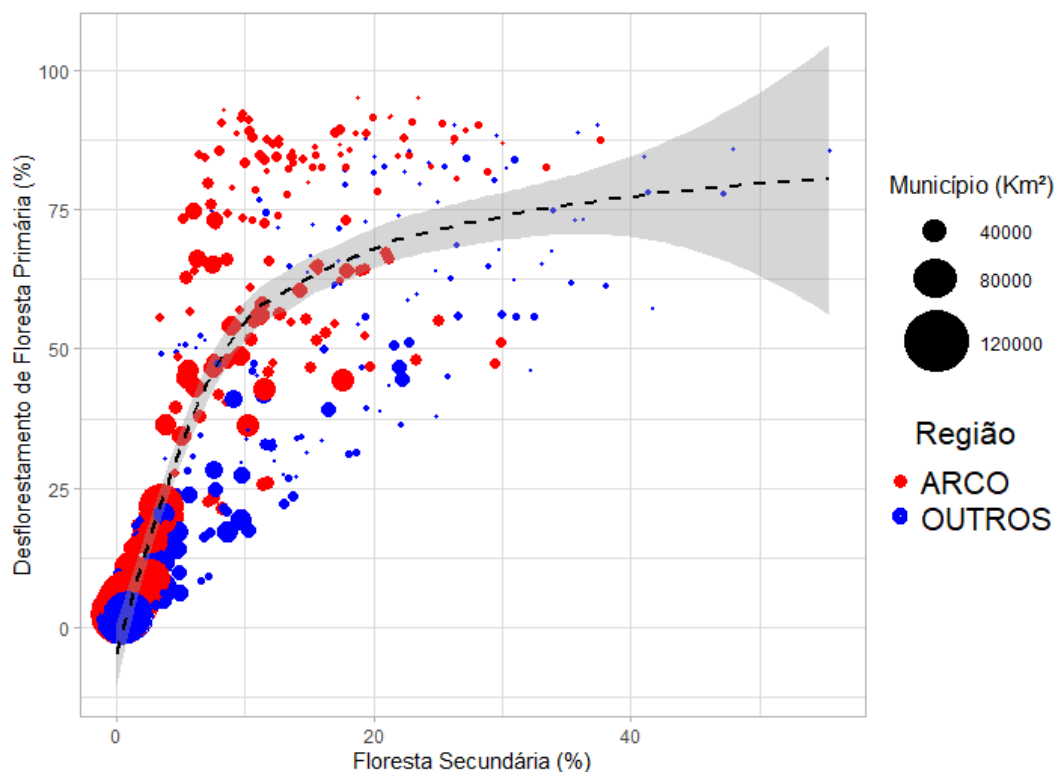
**Figura 13.** Mapa de Densidade de Kernel no estado do Pará



A partir da cronossequência das florestas secundárias, foi possível gerar a perda de floresta secundária, ou seja, a quantidade de floresta secundária que foi desflorestada entre os anos de 2000 e 2014. Como observado na Figura 14 e na Tabela 4, dividiu-se os municípios entre pertencentes ao arco do desmatamento e os demais para verificar o desmatamento em municípios que já possuem grande alteração em suas florestas maduras.

Os municípios em vermelho representaram áreas dentro do arco do desmatamento onde grande parte dos municípios com área menor possuíram áreas de florestas primárias acima de 50% desmatadas em sua maioria, podendo chegar em até 95% de sua área de vegetação original perdida. Municípios que possuem sua área maior, não apresentaram elevada porcentagem de desmatamento, porém, em valores absolutos representam grande parte do desmatamento do estado.

**Figura 14.** Desmatamento de Florestas primárias em função das Florestas secundárias por área do município



Por meio das análises de geoprocessamento, foram verificadas as áreas de floresta primária e secundárias desmatadas de acordo com municípios pertencentes ao arco do desmatamento e aos demais (Tabela 4). Entre os municípios pertencentes ao arco, 104.360 km<sup>2</sup> de florestas já foram desmatadas, destes, 61.967 Km<sup>2</sup> de florestas maduras e estima-se 45.272 Km<sup>2</sup> de florestas secundárias, este total representa 59,98% de áreas desflorestadas no estado do Pará. Já os demais municípios representaram 40,02% das áreas desflorestadas em todo Estado apenas entre o período de 2000 e 2014.

**Tabela 4.** Desmatamento total no estado do Pará

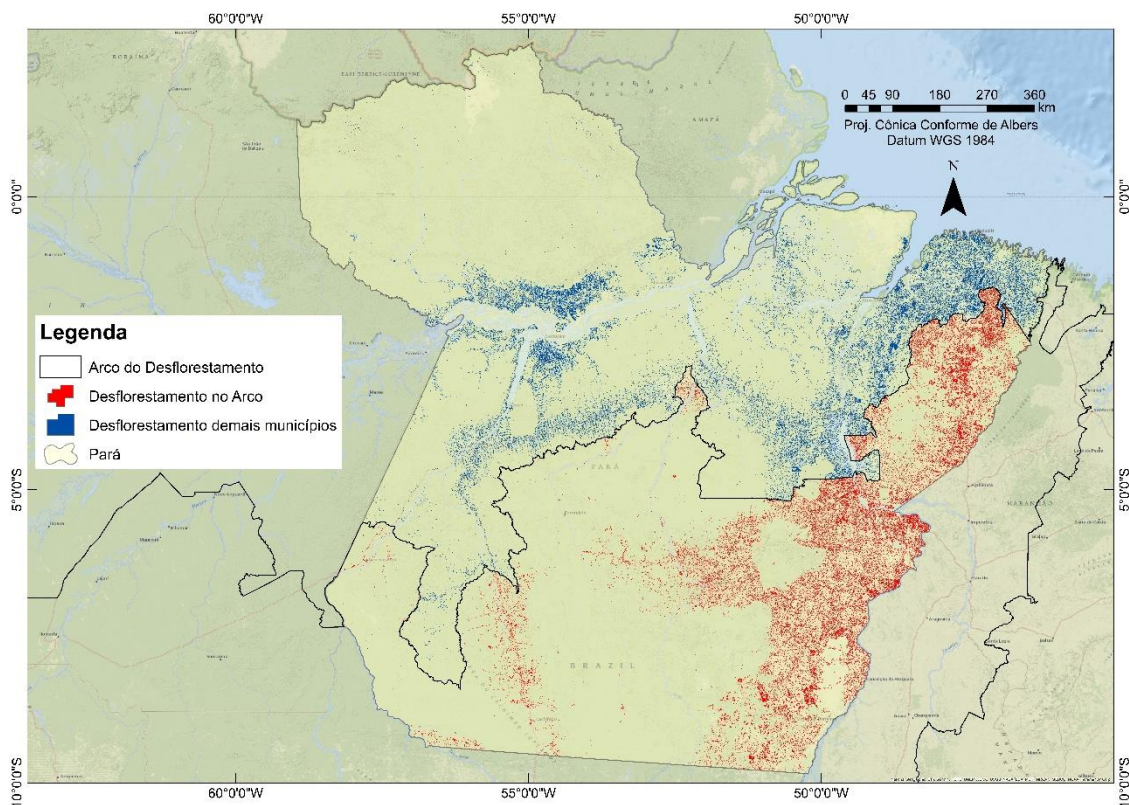
MUNICÍPIOS	DFP (Km <sup>2</sup> )	DFS SECUNDÁRIA (Km <sup>2</sup> )	D. TOTAL (Km <sup>2</sup> )	%
ARCO DO DESMATAMENTO	61.967,72	45.272,26	104.360,34	59,98
OUTROS	46.225,28	44.819,70	63.641,42	40,02
<b>TOTAL</b>	<b>114.193,00</b>	<b>90.091,97</b>	<b>174.001,76</b>	<b>100</b>

DFP = Desmatamento acumulado em floresta primária (Km<sup>2</sup>) entre 2000 e 2014; DFS = Desmatamento acumulado em florestas secundárias entre 2000 e 2014 (Km<sup>2</sup>); D. Total = DFP + DFS; % = porcentagem de desmatamento total do estado do Pará.

A partir dos dados de desmatamento de florestas secundárias foi gerado um mapa (Figura 15) para o estado do Pará para verificar a distribuição do desmatamento. Como observado antes pelos mapas de *hot spots*, a distribuição do desmatamento em florestas secundárias também aconteceu de acordo com as rotas de escoamento da produção. Entretanto houve grande concentração de pontos desmatados em regiões de interesses específicos, assim como houveram regiões que não sofreram desmatamento.

A importância do Sistema Nacional de Unidades de Conservação pode ser observada com nitidez na região de interseção onde houveram pontos em vermelho (arco do desmatamento) e os demais municípios, na qual encontra-se a Terra Indígena Parakanã. Ao entorno desta área de proteção, houve um grande desmatamento de floresta madura, e posteriormente como mostrado no mapa, também houve grande desmatamento de florestas secundárias, porém a terra indígena continuou-se preservada. Isso mostra a influência de políticas do poder público no uso e proteção destas terras.

**Figura 15.** Distribuição dos fragmentos de florestas secundárias desflorestados entre 2000 e 2014



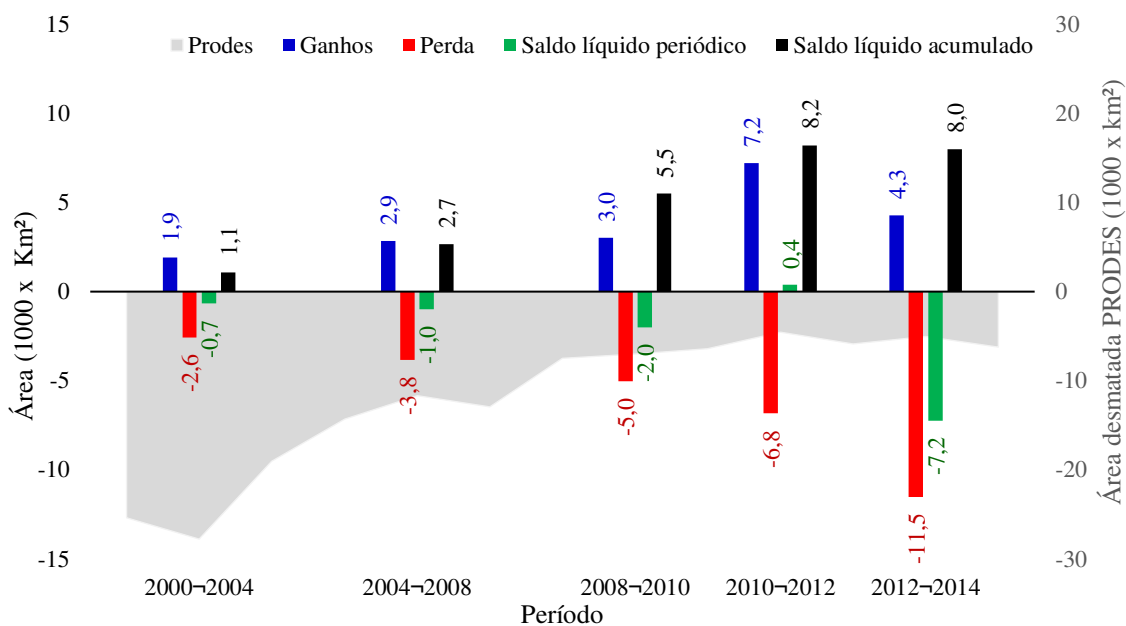
A partir do mapa de desmatamento, foi feito um balanço dos ganhos e perdas de florestas secundárias no Pará entre o período de 2000 e 2014. A análise foi feita em intervalos de tempo de acordo com os dados disponíveis pelo TerraClass. No primeiro período analisado (2000 a 2004) o Pará obteve um ganho de 1,9 km<sup>2</sup> de taxa anual de floresta secundária e sofreu a perda de 2,6 km<sup>2</sup>/ano, neste sentido, o período obteve um saldo líquido negativo de 0,7 km<sup>2</sup>/ano com saldo bruto acumulado de 1,1 km<sup>2</sup>/ano (Figura 16).

O segundo período avaliado, apresentou ganho de 2,9 e perda de 3,8 km<sup>2</sup>/ano com saldo líquido negativo de 1 km<sup>2</sup>/ano e saldo bruto acumulado de 2,7 km<sup>2</sup>/ano. Destaca-se o período compreendido entre 2010 e 2012 com um saldo bruto acumulado de 8,2 km<sup>2</sup>/ano de floresta secundária, e o último período de estudo com uma perda de 11,5 km<sup>2</sup>/ano de floresta secundária. O crescente aumento entre 2008 e 2014 também é observado por Wang et al., (2020) tanto para florestas maduras quanto para florestas secundárias.

Este balanço demonstrou a importância da compreensão de como as florestas secundárias estão sendo manejadas. Como demonstrado anteriormente na Figura 14, houveram municípios que já desflorestaram praticamente todo o seu recurso de floresta madura, por conseguinte, buscam recursos em outras fontes como as florestas secundárias. Este estudo busca levantar o contexto da utilização das florestas secundárias no Pará no atual cenário de desmatamento.

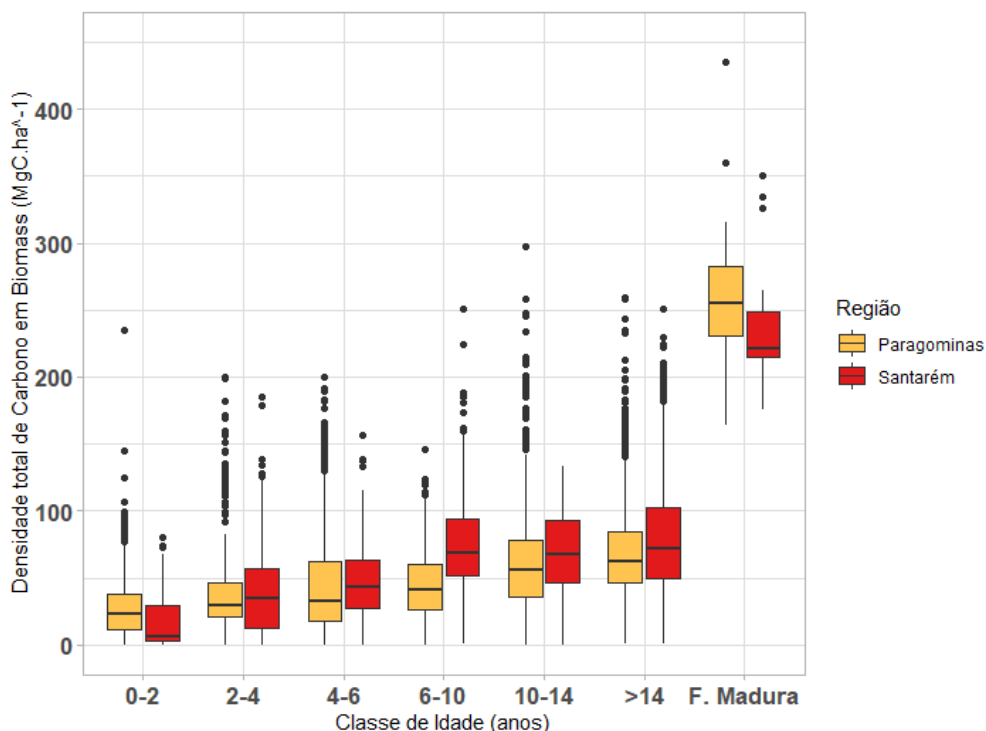
A necessidade da proteção das florestas secundárias é algo que precisa ser discutido em diversas esferas da sociedade, e seu desmatamento pode se dar por diversas razões, até mesmo por falta de definição prática de a partir de que momento uma floresta começa a ser considerada secundária (WANG et al., 2020).

**Figura 16.** Balanço de ganhos e perdas de florestas secundárias no Pará entre 2000 e 2014



Ao falar de desmatamento de florestas secundárias, é importante entender como isso tem impactado na recuperação de biomassa com o passar dos anos. Ao analisar a densidade de Carbono em Biomassa ( $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) em dois municípios no estado do Pará, observou-se o comportamento semelhante em relação às classes de idade, onde o acúmulo de biomassa nos dois municípios são diferentes ao longo do tempo. Com o passar dos anos, as florestas secundárias armazenam diferentes quantidades de carbono por hectare/ano de acordo com as classes de idade. Estima-se que florestas secundárias acima de 14 anos em Paragominas apresentam em média 29,46% da biomassa de uma floresta madura na mesma região e as florestas secundárias do tapajós com mesma idade apresentam em média 33,57% da biomassa de uma floresta madura.

**Figura 17.** Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (LONGO et al., 2016)



A menor estimativa por classe de idade encontrada foi na classe de 0 a 2 anos de idade com a média e desvio padrão de  $27,10 \pm 20,97$  e  $17,18 \pm 19,61$   $\text{MgC.ha}^{-1}$  para Paragominas e Santarém, respectivamente. A classe de idade que agrupa florestas secundárias acima de 14 anos apresentou a maior média com  $68,08 \pm 34,39$  e  $79,06 \pm 40,80$   $\text{MgC.ha}^{-1}$  (Tabela 5).

**Tabela 5.** Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de Longo et al., (2016)

Classe de idade	Paragominas				Santarém			
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$
1	27,11	20,97	439,78	2.326	17,18	19,61	384,50	155
2	43,48	38,63	1.492,25	545	38,17	31,43	987,74	478
3	45,95	40,67	1.654,04	1.333	45,73	32,15	1.033,32	140
4	43,97	24,01	576,65	1.836	75,86	43,64	1.904,49	284
5	62,44	40,83	1.666,81	1.660	69,32	31,32	981,07	594
6	68,08	34,39	1.182,65	2.848	79,06	40,80	1.664,97	2.235
7	287,07	91,75	8.418,70	13	235,51	41,05	1.685,18	29

$\bar{X}$  = média;  $\sigma$  = desvio padrão populacional;  $\sigma^2$  = variância populacional;  $N^\circ = n^\circ$  de observações

Por meio da Análise de variância (Tabela 6), verificou-se que houve acúmulo de biomassa significativo ( $p < 0,001$ ) ao longo do tempo nas classes de idade de florestas secundárias. Também, pode-se afirmar que houve diferença significativa ( $p < 0,001$ ) entre as biomassas comparando os municípios de Paragominas e Santarém quando relacionados os acúmulos de biomassa no período de tempo estudado, denotando que variações regionais (qualidade do sítio) influenciam na recuperação da biomassa. Este resultado corroborou com o que foi encontrado por Rozendaal et al., (2017), onde em florestas secundárias na região neotropical acumularam diferentes quantidades de biomassa acima do solo em diferentes áreas.

**Tabela 6.** Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de (LONGO et al., 2016)

Fonte de variação	gl	SQ	MQ	F	Pr(>F)
Classe de idade	6	5.873.814	978.969	823,5	<2e-16***
Municípios	1	184.395	184.395	115,3	<2e-16***
Resíduo	14.468	17.199.278	1.189		
<b>Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</b>					

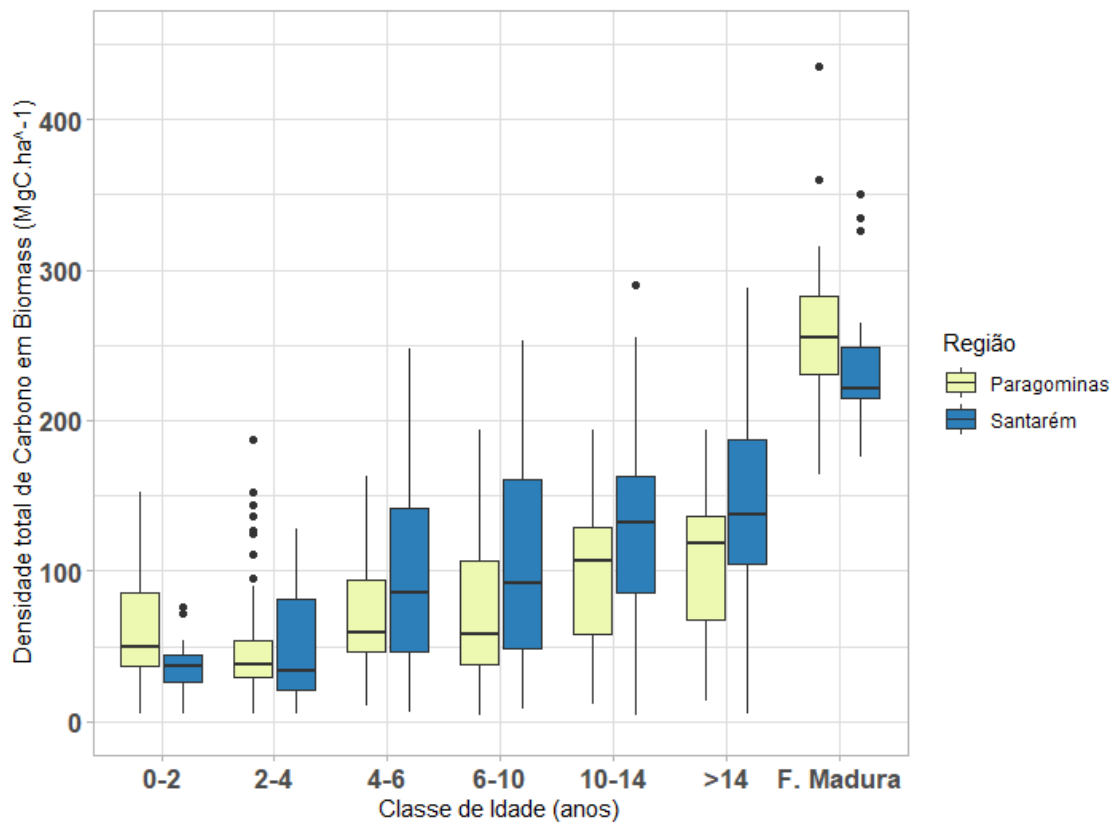
gl = Grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados;

Para o segundo banco de dados (ALMEIDA et al., 2019), também foi possível observar o acúmulo de biomassa com o passar do tempo, com exceção da primeira classe de idade em Paragominas que apresentou elevada quantidade de biomassa na classe inicial. Quando comparado com o primeiro banco de dados, Almeida superestima a biomassa demonstrando que florestas secundárias acima de 14 anos já apresentam em média 46,4% da biomassa de florestas maduras nas mesmas regiões.

O resultado diferente da primeira base de dados demonstrou a importância do mapeamento local utilizando dados de campo para calibrar o modelo de estimativa de biomassa e a influência das imagens hiperespectrais utilizadas neste modelo podem sofrer alterações por condições atmosféricas.



**Figura 18.** Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (ALMEIDA et al., 2019)



Para a segunda base de dados (ALMEIDA et al., 2019), a menor estimativa média por classe de idade encontrada foi na classe de 2 a 4 anos de idade com a média e desvio padrão de  $48,61 \pm 35,80 \text{ MgC.ha}^{-1}$  em Paragominas, e de 0 a 2 anos com média de  $36,08 \pm 16,68 \text{ MgC.ha}^{-1}$  para Santarém. A classe de idade que agrupa florestas secundárias acima de 14 anos apresentou a maior média com  $103,68 \pm 43,87$  e  $138,88 \pm 58,56 \text{ MgC.ha}^{-1}$  para Paragominas e Santarém, respectivamente (Tabela 7).

**Tabela 7.** Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de (ALMEIDA et al., 2019)

Classe de idade	Paragominas				Santarém			
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$
1	63,87	34,81	1211,87	2332	36,08	16,68	278,31	93
2	48,61	35,80	1281,95	531	45,86	38,91	1514,15	22
3	71,22	35,78	1280,17	1147	99,90	59,76	3570,78	625
4	71,39	38,76	1502,32	2105	108,34	70,17	4924,25	517
5	95,50	41,53	1725,00	1846	129,97	58,77	3453,69	1466
6	103,68	43,87	1924,62	2798	138,88	58,56	3428,96	2127
7	287,07	91,75	8418,70	13	235,51	41,05	1685,18	29

$\bar{X}$  = média;  $\sigma$  = desvio padrão populacional;  $\sigma^2$  = variância populacional;  $N$  = n° de observações

Por meio da Análise de variância (tabela 8), verificou-se que houve efeito das classes de idade sobre o acúmulo de biomassa ( $p < 0,001$ ) ao longo do tempo nas idades de florestas secundárias. Também, pode-se afirmar que houve efeito do território (municípios) ( $p < 0,001$ ) sobre a biomassa comparando os municípios de Paragominas e Santarém.

**Tabela 8.** Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de Ometto et al, (2016)

Fonte de variação	gl	SQ	MQ	F	Pr(>F)
Classe de idade	6	9.392.643	1.565.441	709,8	<2e-16***
Municípios	1	3.022.703	3.022.703	1370,6	<2e-16***
Resíduo	15.643	34.499.759	9		

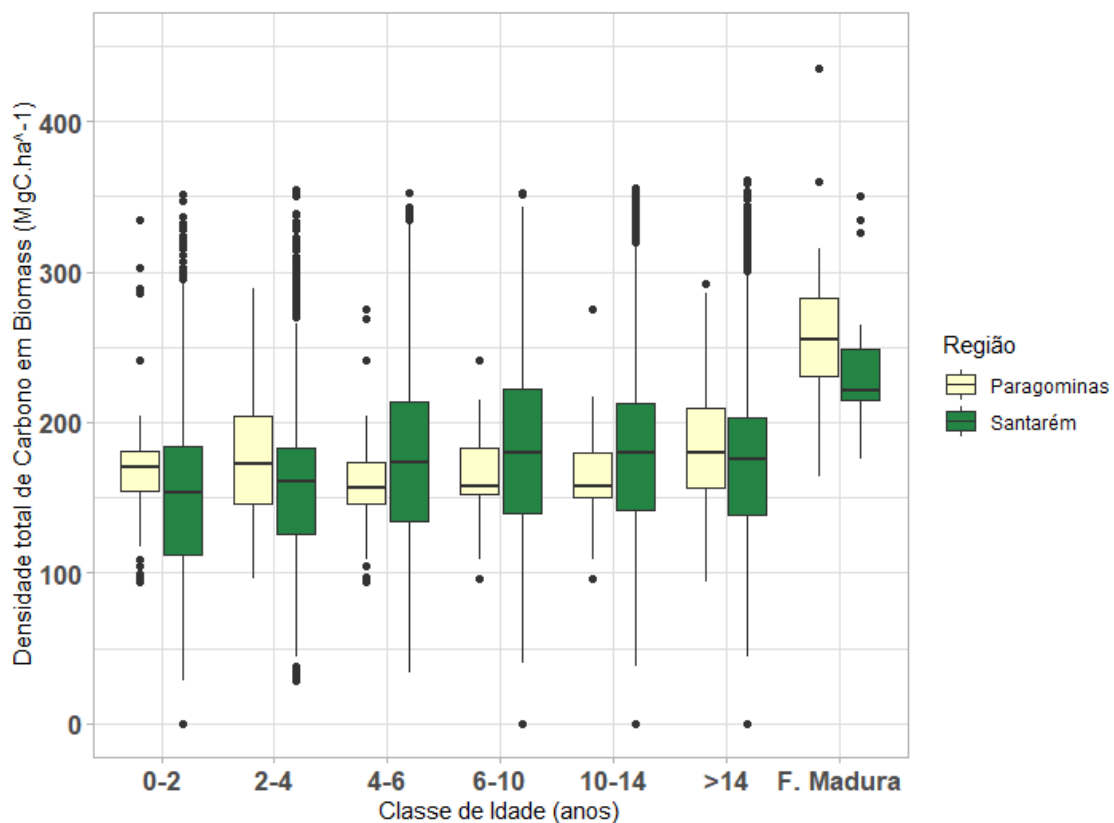
**Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1**

gl = Grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados;

Para o terceiro banco de dados (BACCINI et al., 2012), também foi possível observar o acúmulo de biomassa com o passar do tempo, porém sem muita variação. Todas as classes de idade apresentam valores superestimados de biomassa acima do solo comparando com outras bases de dados. A biomassa das florestas secundárias também foi superestimada demonstrando que florestas secundárias acima de 14 anos já apresentam em média 69,73% da biomassa de florestas maduras nas mesmas regiões.

O resultado diferente das demais bases de dados também demonstrou a importância do mapeamento local utilizando dados de campo para calibrar o modelo de estimativa de biomassa. Este modelo é de escala global utilizando imagens com resolução espacial de 500 metros, ajustado para as florestas maduras nos trópicos, o que acabou superestimando. A própria resolução espacial já se torna um fator determinante para o elevado erro na estimativa de biomassa em florestas secundárias, visto que as florestas mais jovens são fragmentos menores em área, e um pixel de 500m de resolução acaba agrupando diversos tipos de uso em um único pixel.

**Figura 19.** Distribuição da densidade de Carbono em Biomassa em função das classes de idades em Florestas Secundárias (BACCINI et al., 2012)



Para a terceira base de dados (BACCINI et al., 2012), a menor estimativa por classe de idade encontrada foi na classe de 10 a 12 anos de idade com a média e desvio padrão de  $161,36 \pm 28,61 \text{ MgC.ha}^{-1}$  em Paragominas, e de 0 a 2 anos com média desvio padrão de  $155,14 \pm 57,37 \text{ MgC.ha}^{-1}$  para Santarém. A classe de idade que agrupa florestas secundárias acima de 14 anos apresentou

a maior média e desvio padrão com  $187,60,68 \pm 45,86$  e  $176,84 \pm 52,59$  MgC.ha<sup>-1</sup> para Paragominas e Santarém, respectivamente (Tabela 9).

**Tabela 9.** Estatística descritiva da Biomassa segundo dados de (BACCINI et al., 2012)

Classe de idade	Paragominas				Santarém			
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	$N$
1	167,08	27,72	768,33	2528	155,14	57,37	3.291,63	8.688
2	177,61	39,98	1598,62	609	158,44	46,55	2.166,60	49.758
3	155,93	26,73	714,39	1190	181,36	64,56	4.168,38	48.138
4	163,01	25,00	625,01	1928	186,90	63,75	4.063,99	14.569
5	161,36	28,61	818,28	1392	183,61	59,06	3.487,77	55.254
6	187,60	45,86	2.103,57	3148	176,84	52,59	2.765,86	64.798
7	287,07	91,75	8.418,70	13	235,51	41,05	1685,18	29

$\bar{X}$  = média;  $\sigma$  = desvio padrão populacional;  $\sigma^2$  = variância populacional;  $N^\circ$  = n° de observações

Por meio da Análise de variância (Tabela 10), verificou-se que houve acúmulo de biomassa significativo ( $p < 0,001$ ) ao longo do tempo nas idades de florestas secundárias. Também, pode-se afirmar que há diferença significativa ( $p < 0,001$ ) entre as biomassas comparando os municípios de Paragominas e Santarém quando relacionados os acúmulos de biomassa no período de tempo estudado.

**Tabela 10.** Análise de variância (ANOVA) referente à base de dados de (BACCINI et al., 2012)

Fonte de variação	gl	SQ	MQ	F	Pr(>F)
Classe de idade	6	24.025.112	4.004.185	1286,8	<2e-16***
Municípios	1	109.223	109.223	35,1	3,13e-09***
Resíduo	252.034	784.252.583	3112		

**Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1**

gl = Grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; MQ = Média dos quadrados;

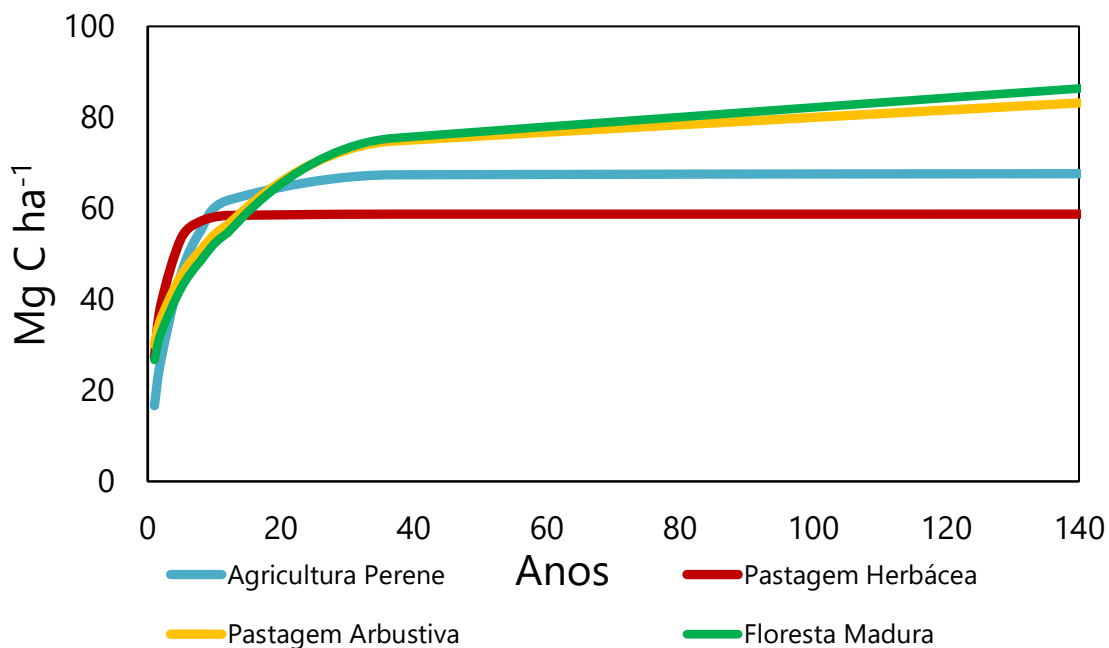
Portanto, a utilização de dados de campo associadas com múltiplos dados de sensoriamento remoto são alternativas para a melhoria destas estimativas de biomassa acima do solo, conforme observado por nos resultados obtidos pela da combinação de dados de inventário florestal somados aos dados de LIDAR,

corroborando com resultados encontrados por D'oliveira et al., (2012), Cassol et al., (2018) e Jorge (2018). Entretanto, limitações como o tamanho da área a ser estudada pode limitar algumas operações, visto isso, o *upscaling* pode ser limitado pelo número de amostras, tamanho das parcelas e o tempo entre uma amostragem e outra (JORGE, 2018; SULLIVAN et al., 2018). Desta maneira, há grande importância em testar e estimar diversos modelos que levem em considerações variáveis biológicas associadas com as métricas obtidas com a utilização do sensoriamento remoto.

Por meio do modelo proposto por Chapman & Richards (1961/1959), foram modeladas as biomassas de florestas secundárias oriundas de diferentes classes de uso da terra para cada base de dados. O primeiro banco de dados (LONGO et al., 2016) demonstrou as curvas para as classes de florestas secundárias advindas de florestas maduras, agricultura perene, e pastagens herbácea e arbustiva. Como esperado, as classes de florestas secundárias advindas de florestas maduras apresentam maior biomassa recuperada ao longo do tempo em estágios mais avançados, seguida por pastagem arbustiva que pode ser justificada pelo processo de regeneração das florestas de forma natural ou antrópica em pastagens abandonadas ou com pouca gestão.

O comportamento da curva dá-se de maneira diferente para cada uso anterior. No início da regeneração, as florestas secundárias mais jovens advindas das classes de pastagens apresentam maior quantidade de recuperação de sua biomassa. Porém, com o passar dos anos, as florestas secundárias advindas de florestas maduras apresentam maior recuperação em estágios mais velhos. Este fato pode ser justificado pela própria composição da floresta anterior presente naquele determinado local, possuindo banco de sementes e dependendo da forma com que foi desflorestada e a influência de nutrientes presentes do solo. A classe de agricultura perene apresenta boa recuperação em estágios de idade intermediários, podendo ser justificada pelos tratamentos de solo e adubação que as áreas podem ter recebido, bem como o tipo de cultura ali antes existente.

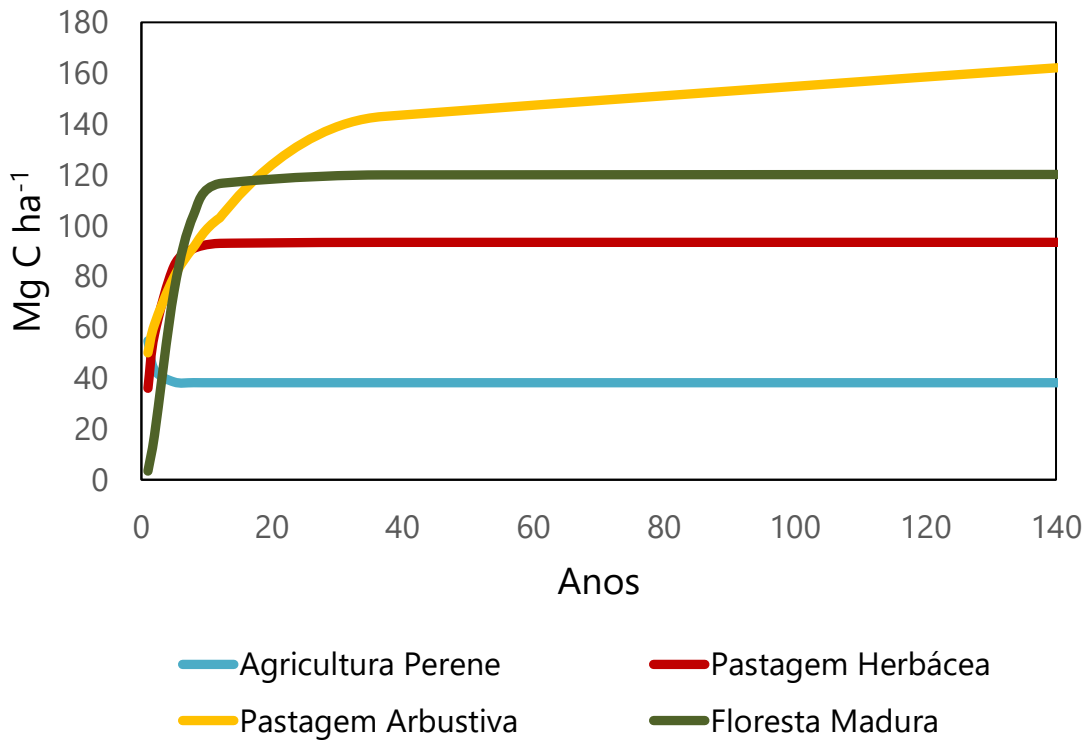
**Figura 20.** Recuperação de Biomassa de acordo com o uso anterior da terra referente à base de dados de Longo, et al. (2016)



Para a segunda base de dados aplicou-se o mesmo modelo e foram encontrados resultados diferentes. Segundo os dados de Almeida et al., (2019) as florestas secundárias advindas de pastagem arbustiva possuem maior recuperação em estágio mais avançados das florestas secundárias seguidas por florestas secundárias e pastagem herbácea. Já a classe de agricultura perene não se ajustou adequadamente para este modelo, apresentando menores quantidades de biomassa acumulada com o passar do tempo.

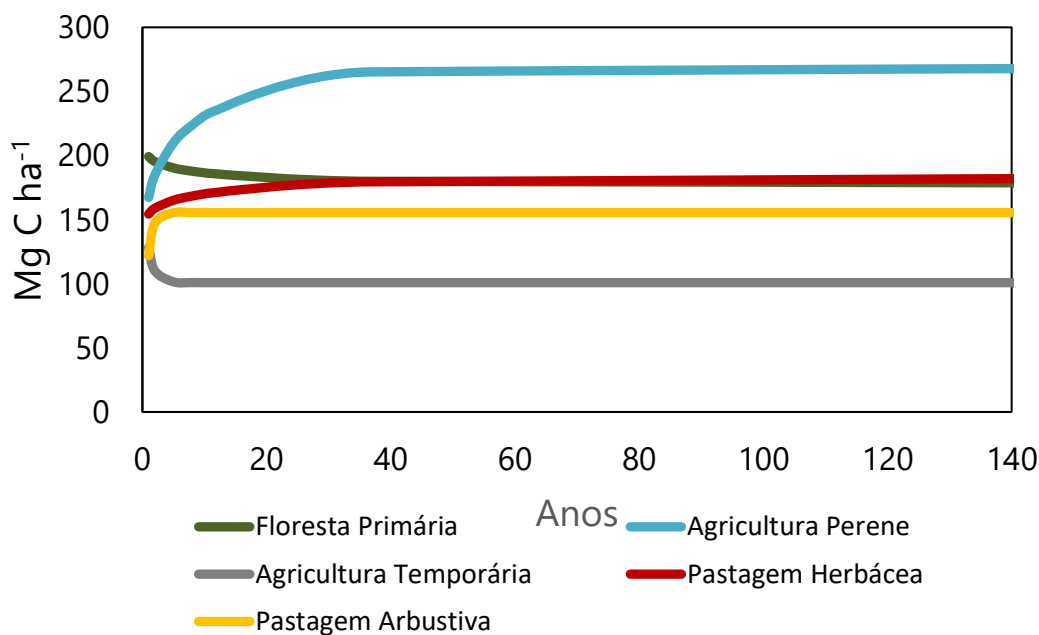
A escala espacial utilizada em cada banco de dado pode ter sido o fator determinante para a diferença no acúmulo de biomassa no decorrer do tempo. Segundo Briassoulis (2000), as resoluções espaciais para a observação de eventos e suas consequências podem ser um fator condicionante, por isso as tecnologias de uso de LiDAR aliadas à dados de campo são importantes para a otimização dos modelos (LONGO et al., 2016)

**Figura 21.** Recuperação da Biomassa de acordo com o uso anterior da terra segundo a metodologia de Almeida et al., (2019)



Para a terceira base de dados Baccini et. al (2012), os modelos não se ajustaram adequadamente. Os valores médios de biomassa foram muito próximos em cada classe fazendo com que o modelo não pudesse estimar o acúmulo com o passar do tempo. Em uma escala de 500m x 500m de resolução, polígonos de diferentes classes acabam se agrupando atribuindo um único valor de biomassa, isso influencia diretamente o resultado obtido para escalas mais finas de análises locais.

**Figura 22.** Recuperação da Biomassa de acordo com o uso anterior da terra segundo a metodologia de Baccini et. al (2012)



Em contrapartida, ainda assim há muitas estimativas de biomassa acima do solo disponíveis na literatura combinando diferentes métodos. Entretanto, aliadas a estas estimativas estão as incertezas dos modelos que podem variar de acordo com cada ajuste. Diante disso, o desenvolvimento de modelos biológicos combinados com diferentes técnicas de sensoriamento remoto pode diminuir estas incertezas.

## 6 CONCLUSÃO

O sistema de monitoramento do uso do solo tem revelado que os efeitos geopolíticos locais influenciam na distribuição da incidência e do tamanho dos fragmentos de florestas secundárias.

Existem polos de surgimento e desmatamento de florestas secundárias, com sinais relacionando tamanho de municípios com distribuição dos fragmentos

Ganhos e perdas de florestas secundárias variaram ao longo do período estudado.



Nos últimos anos do período, o desmatamento de florestas maduras no Pará esteve em baixos níveis, mas o desmatamento em florestas secundárias aumentou. Isso pode revelar uma questão geopolítica na necessidade constante de uso de recursos florestais, sejam em florestas maduras ou jovens.

A resolução espacial e o método utilizado para a estimativa de biomassa afetam diretamente a estimativa de biomassa ao longo do tempo.

Para o melhor modelo ajustado, as florestas secundárias advindas de florestas maduras e pastagem apresentam melhor recuperação da biomassa ao longo do tempo. É necessário testar um maior número de modelos biológicos para obter melhores resultados do acúmulo de biomassa em função do tipo de uso anterior.

Recomenda-se utilizar dados de sensoriamento remoto aliados com dados de campos para melhor estimativa de biomassa acima do solo.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, Ana Paula Dutra et al. Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 1821–1840, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13134. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.13134>.

AGUIAR, Diego Ribeiro; GAMA, João Ricardo Vasconcellos; BELDINI, Troy Patrick. Estoque de carbono por grupo ecológico na Floresta Nacional do Tapajós. **Espacios**, [S. l.], v. 38, n. 32, p. 21, 2017.

ALMEIDA, Catherine Torres De et al. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 232, n. March, p. 111323, 2019. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111323. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111323>.

ALMEIDA, Cláudio Aparecido De; COUTINHO, Alexandre Camargo; ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora; ADAMI, Marcos; VENTURIERI, Adriano; DINIZ, Cesar Guerreiro; DESSAY, Nadine; DURIEUX, Laurent; GOMES, Alessandra Rodrigues. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 291–302, 2016. DOI: 10.1590/1809-4392201505504. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0044-59672016000300291&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672016000300291&lng=en&tlng=en).

AMLIN, G.; SURATMAN, M. N.; ISA, N. N. M. Anthropogenic Impacts on Forest Regeneration: Challenges and the Way Forward. *In*: SYMPOSIUM ON BUSINESS, ENGINEERING AND INDUSTRIAL APPLICATIONS 2012, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 158–162.

ARAGÃO, Luiz E. O. C.; POULTER, Benjamin; BARLOW, Jos B.; ANDERSON, Liana O.; MALHI, Yadvinder; SAATCHI, Sassan; PHILLIPS, Oliver L.; GLOOR, Emanuel. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014. DOI: 10.1111/brv.12088. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/brv.12088>.

ASNER, Gregory P. Selective Logging in the Brazilian Amazon. **Science**, [S. l.], v. 310, n. 5747, p. 480–482, 2005. DOI: 10.1126/science.1118051. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1118051>.

ASNER, Gregory P.; KELLER, Michael; PEREIRA, JR, Rodrigo; ZWEEDE, Johan C.; SILVA, Jose N. M. Canopy damage and recovery after selective logging in Amazonia: Field and satellite studies. **Ecological Applications**, [S. l.], v. 14, n. sp4, p. 280–298, 2004. DOI: 10.1890/01-6019. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1890/01-6019>.

BACCINI, A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 182–185, 2012. DOI: 10.1038/nclimate1354. Disponível em:

<http://www.nature.com/articles/nclimate1354>.

BIANCHI, Miriam de Oliveira. **Avaliação da funcionalidade do solo em sistemas florestais enriquecidos com leguminosas**. 2009. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, [S. l.], 2009.

BRIASSOULIS, Helen. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. West Virginia: Regional Research Institute, West Virginia University, 2000. v. 1

BROWN, Sandra; LUGO, Ariel E. Tropical secondary forests. **Journal of Tropical Ecology**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1–32, 1990. DOI: 10.1017/S0266467400003989. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913339501900201>.

CARVALHO, Georgia O. Metallurgical Development in the Carajás Area: A Case Study of the Evolution of Environmental Policy Formation in Brazil. **Society & Natural Resources**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 127–143, 2001. DOI: 10.1080/089419201300000535. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/089419201300000535>.

CASSOL, Henrique Luis Godinho; CARREIRAS, João Manuel de Brito; MORAES, Elisabete Caria; ARAGÃO, Luiz Eduardo Oliveira e Cruz De; SILVA, Camila Valéria de Jesus; QUEGAN, Shaun; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Retrieving Secondary Forest Aboveground Biomass from Polarimetric ALOS-2 PALSAR-2 Data in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 59, 2018. DOI: 10.3390/rs11010059. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/11/1/59>.

CHAPMAN, D. G. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations. In: FOURTH BERKELEY SYMPOSIUM ON MATHEMATICS, STATISTICS AND PROBABILITY 1961, **Anais [...]**. : University of California Press Berkeley, 1961. p. 153–168. Disponível em: [https://projecteuclid.org/download/pdf\\_1/euclid.bsm/1200512883](https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.bsm/1200512883).

CHATURVEDI, R. K.; RAGHUBANSHI, A. S.; SINGH, J. S. Effect of grazing and harvesting on diversity, recruitment and carbon accumulation of juvenile trees in tropical dry forests. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 284, p. 152–162, 2012. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.07.053. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112712004665>.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, [S. l.], v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005. DOI: 10.1007/s00442-005-0100-x. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00442-005-0100-x>.

CHAZDON, Robin L. **Second Growth**. Chicago e Londres: University of Chicago Press, 2014. v. 32 DOI: 10.7208/chicago/9780226118109.001.0001. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02394968>.

CHAZDON, Robin L. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, [S. l.], v. 2, n. 5, p. e1501639, 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1501639. Disponível em:

<http://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.1501639>.

CHAZDON, ROBIN L.; PERES, CARLOS A.; DENT, DAISY; SHEIL, DOUGLAS; LUGO, ARIEL E.; LAMB, DAVID; STORK, NIGEL E.; MILLER, SCOTT E. The Potential for Species Conservation in Tropical Secondary Forests. **Conservation Biology**, [S. l.], v. 23, n. 6, p. 1406–1417, 2009. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01338.x. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1523-1739.2009.01338.x>.

CORLETT, Richard T. What is secondary forest? **Journal of Tropical Ecology**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 445–447, 1994. DOI: 10.1017/S0266467400008129. Disponível em: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0266467400008129/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0266467400008129/type/journal_article).

COUTINHO, Alexandre Camargo; ALMEIDA, Cláudio; VENTURIERI, Adriano; ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora; SILVA, Maurício. **Uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas da Amazônia Legal: TerraClass 2008**. Brasília. DF Embrapa; Belém: INPE.

D'OLIVEIRA, Marcus V. N.; REUTEBUCH, Stephen E.; MCGAUGHEY, Robert J.; ANDERSEN, Hans Erik. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 124, p. 479–491, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.014>.

DALAL, Ram C.; ALLEN, Diane E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. **Australian Journal of Botany**, [S. l.], v. 56, n. 5, p. 369, 2008. DOI: 10.1071/BT07128. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/?paper=BT07128>.

FEARNSIDE, Philip M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 80, n. 1–3, p. 21–34, 1996. DOI: 10.1016/0378-1127(95)03647-4. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378112795036474>.

FEARNSIDE, Philip M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 395–400, 2006. DOI: 10.1590/S0044-59672006000300018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0044-59672006000300018&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672006000300018&lng=pt&tlng=pt).

FELDPAUSCH, T. R. et al. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, [S. l.], v. 9, n. 8, p. 3381–3403, 2012. DOI: 10.5194/bg-9-3381-2012. Disponível em: <https://www.biogeosciences.net/9/3381/2012/>.

FENG, Yunyun; LU, Dengsheng; CHEN, Qi; KELLER, Michael; MORAN, Emilio; DOS-SANTOS, Maiza Nara; BOLFE, Edson Luis; BATISTELLA, Mateus. Examining effective use of data sources and modeling algorithms for improving biomass estimation in a moist tropical forest of the Brazilian Amazon.

**International Journal of Digital Earth**, [S. l.], v. 10, n. 10, p. 996–1016, 2017. DOI: 10.1080/17538947.2017.1301581. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2017.1301581>.

FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M. et al. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO<sub>2</sub> and temperature. **Nature Climate Change**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 73–79, 2019. DOI: 10.1038/s41558-018-0367-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0367-7>.

FOLEY, Jonathan A. et al. Global Consequences of Land Use. **Science**, [S. l.], v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005. DOI: 10.1126/science.1111772. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1111772>.

GRAÇA, Paulo Maurício Lima de Alencastro; MALDONADO, Francisco Dario; SANTOS, João Roberto Dos; SOARES, João Vianeí. Detecção de corte seletivo de madeira por técnica de rotação radiométrica na floresta amazônica. **Ambiência**, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 97–106, 2009.

GUARIGUATA, Manuel R.; OSTERTAG, Rebecca. Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 148, n. 1–3, p. 185–206, 2001. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00535-1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112700005351>.

GUIMARÃES, Jayne; VERÍSSIMO, Adalberto; AMARAL, Paulo; DEMACHKI, Adnan. **Municípios verdes: caminhos para a sustentabilidade**. Instituto ed. Belém: Imazon, 2011.

HANSEN, M. C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, [S. l.], v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013. DOI: 10.1126/science.1244693. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1244693>.

INPE. **PRODES - Monitoramento de floresta Amazônica brasileira por satélite**. 2020. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 15 ago. 2019.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama, JAPAN.

JOPPA, Lucas N.; PFAFF, Alexander. Global protected area impacts. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S. l.], v. 278, n. 1712, p. 1633–1638, 2011. DOI: 10.1098/rspb.2010.1713. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2010.1713>.

JORGE, Anderson. **Estimativa de Biomassa, em Áreas Degradadas e Não Degradadas, por meio de Isolamento de Árvores com Dados LIDAR**. 2018. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [S. l.], 2018. DOI: 10.1080/17538947.2014.990526. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2014.990526>.

JUCKER, Tommaso et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 177–190, 2017. DOI: 10.1111/gcb.13388. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.13388>.

JUNGES, Alexandre Luis; SANTOS, Vinícius Yuri; MASSONI, Neusa Teresinha; SANTOS, Francinède Amorin Costa. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**, [S. l.], v. 13, n. 5, p. 126–151, 2018.

LAURANCE, W. F. Biomass Collapse in Amazonian Forest Fragments. **Science**, [S. l.], v. 278, n. 5340, p. 1117–1118, 1997. DOI: 10.1126/science.278.5340.1117. Disponível em: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.278.5340.1117>.

LE QUÉRÉ, Corinne et al. Global Carbon Budget 2016. **Earth System Science Data**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 605–649, 2016. DOI: 10.5194/essd-8-605-2016. Disponível em: <https://www.earth-syst-sci-data.net/8/605/2016/>.

LONGO, Marcos et al. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, [S. l.], v. 30, n. 11, p. 1639–1660, 2016. DOI: 10.1002/2016GB005465. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/2016GB005465>.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon Tipping Point. **Science Advances**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 1–2, 2018. DOI: 10.1126/sciadv.aat2340.

MACIEL, Maria de Nazaré Martins; WATZLAWICK, Luciano Farinha; SCHOENINGER, Emerson Roberto; YAMAJI, Fabio Minoru. Efeito da radiação solar na dinâmica de uma floresta. **Revista de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 4, p. 102–114, 2002.

MARENGO, José; NOBRE, Carlos A.; BETTS, Richard A.; COX, Peter M.; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. Global warming and climate change in Amazonia: Climate-vegetation feedback and impacts on water resources. *In*: **Amazonia and Global Change**. [s.l.] : American Geophysical Union, 2009. p. 273–292. DOI: 10.1029/2008GM000743. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2009GM000903>.

MASSOCA, Paulo Eduardo dos Santos; JAKOVAC, Ana Catarina Conte; BENTOS, Tony Vizcarra; WILLIAMSON, Garry Bruce; MESQUITA, Rita de Cássia Guimarães. Dinâmica e trajetórias da sucessão secundária na Amazônia central Dynamics and trajectories of secondary succession in Central Amazonia. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 235–250, 2012.

MEINERS, Scott J.; CADOTTE, Marc W.; FRIDLEY, Jason D.; PICKETT, Steward T. A.; WALKER, Lawrence R. Is successional research nearing its climax? New approaches for understanding dynamic communities. **Functional Ecology**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 154–164, 2015. DOI: 10.1111/1365-2435.12391. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2435.12391>.

MESQUITA, Rita de Cássia Guimarães; MASSOCA, Paulo Eduardo dos

Santos; JAKOVAC, Catarina Conte; BENTOS, Tony Vizcarra; WILLIAMSON, G. Bruce. Amazon Rain Forest Succession: Stochasticity or Land-Use Legacy? **BioScience**, [S. l.], v. 65, n. 9, p. 849–861, 2015. DOI: 10.1093/biosci/biv108. Disponível em: <http://academic.oup.com/bioscience/article/65/9/849/1996148/Amazon-Rain-Forest-Succession-Stochasticity-or>.

MITCHELL, Andy. **The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics**. ESRI Press ed. Redlands.

MORTON, D. C.; LE PAGE, Y.; DEFRIES, R.; COLLATZ, G. J.; HURTT, G. C. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S. l.], v. 368, n. 1619, p. 1–8, 2013. DOI: 10.1098/rstb.2012.0163. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2012.0163>.

NELSON, Bruce W.; MESQUITA, Rita; PEREIRA, Jorge L. ..; GARCIA AQUINO DE SOUZA, Silas; TEIXEIRA BATISTA, Getulio; BOVINO COUTO, Luciana. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 117, n. 1–3, p. 149–167, 1999. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00475-7. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112798004757>.

NEMER, TANGRIENNE CARVALHO. **Dinâmica da vegetação de Floresta Tropical de Terra Firme influenciada por clareiras de origem antrópica, Moju, Pará, Brasil**. 2014. Universidade de Brasília, [S. l.], 2014. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16195/1/2014\\_TangrienneCarvalhoNemer.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16195/1/2014_TangrienneCarvalhoNemer.pdf).

NOBRE, Carlos A.; REID, Julia; VEIGA, Ana Paula Soares. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012. v. 1a edição Disponível em: [http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos\\_cientificos\\_mc\\_web.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos_cientificos_mc_web.pdf).

PASSOS, Carlos Alberto Moraes; BRAZ, Evaldo Muñoz. Sistemas silviculturais e agroflorestais na fronteira agrícola da Amazônia. **Agrossilvicultura**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 91–98, 2004.

PEREIRA, Cássio Alves; VIEIRA, Ima Célia Guimarães. A Importância das Florestas Secundárias e os Impactos de sua Substituição por Plantios Mecanizados de Grãos na Amazônia. **Interciencia**, [S. l.], v. 26, n. 8, p. 337–341, 2001.

PERZ, Stephen G.; SKOLE, David L. Secondary forest expansion in the Brazilian Amazon and the refinement of forest transition theory. **Society and Natural Resources**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 277–294, 2003. DOI: 10.1080/08941920390178856.

PINTO, Andréa; AMARAL, Paulo; JR., Carlos Souza; VERÍSSIMO, Adalberto; SALOMÃO, Rodney; GOMES, Gleice; BALIEIRO, Cíntia. **Diagnostico Socioeconômico e Florestal do município de Paragominas**.

Belém, PA. Disponível em: <https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/outros/iagnostico-socioeconomico-e-florestal-do.pdf>.

POORTER, Lourens et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, [S. l.], v. 530, n. 7589, p. 211–214, 2016. DOI: 10.1038/nature16512. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature16512>.

RAPPAPORT, Danielle I.; MORTON, Douglas C.; LONGO, Marcos; KELLER, Michael; DUBAYAH, Ralph; DOS-SANTOS, Maiza Nara. Quantifying long-term changes in carbon stocks and forest structure from Amazon forest degradation. **Environmental Research Letters**, [S. l.], v. 13, n. 6, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aac331. Disponível em: <http://stacks.iop.org/1748-9326/13/i=6/a=065013?key=crossref.f1492542a5956e3bb67b5b5f65707411>.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 290–301, 1959. DOI: 10.1093/jxb/10.2.290.

ROZENDAAL, Danaë M. A. et al. Demographic Drivers of Aboveground Biomass Dynamics During Secondary Succession in Neotropical Dry and Wet Forests. **Ecosystems**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 340–353, 2017. DOI: 10.1007/s10021-016-0029-4. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10021-016-0029-4>.

SHANMUGAM, Sanjutha; DALAL, Ram; JOOSTEN, Hans; RAISON, R.; JOO, Goh. SOC Stock Changes and Greenhouse Gas Emissions Following Tropical Land Use Conversions to Plantation Crops on Mineral Soils, with a Special Focus on Oil Palm and Rubber Plantations. **Agriculture**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 133, 2018. DOI: 10.3390/agriculture8090133. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2077-0472/8/9/133>.

SILVA, Carlos; HUDAK, Andrew; VIÉRLING, Lee; KLAUBERG, Carine; GARCIA, Mariano; FERRAZ, António; KELLER, Michael; EITEL, Jan; SAATCHI, Sassan. Impacts of Airborne Lidar Pulse Density on Estimating Biomass Stocks and Changes in a Selectively Logged Tropical Forest. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 10, p. 1068, 2017. DOI: 10.3390/rs9101068. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/10/1068>.

SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. 1986. University of Bath, [S. l.], 1986. DOI: 10.1177/030098589603300105.

SRINIVAS, Kantipudi; SUNDARAPANDIAN, Somaiah. Biomass and carbon stocks of trees in tropical dry forest of East Godavari region, Andhra Pradesh, India. **Geology, Ecology, and Landscapes**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 114–122, 2019. DOI: 10.1080/24749508.2018.1522837. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1522837>.

SULLIVAN, Martin J. P. et al. Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. **Methods in Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 1179–1189, 2018. DOI: 10.1111/2041-210X.12962. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.12962>.



TOMLIN, C. Dana. **Geographic information systems and cartographic modeling**. [s.l.] : Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1990. DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg0128.

WADSWORTH, Frank H. **Forest Production for Tropical America**. [s.l.] : U.S. Department of Agriculture, 1997.

WANG, Yunxia; ZIV, Guy; ADAMI, Marcos; ALMEIDA, Cláudio Aparecido De; ANTUNES, João Francisco Gonçalves; COUTINHO, Alexandre Camargo; ESQUERDO, Júlio César Dalla Mora; GOMES, Alessandra Rodrigues; GALBRAITH, David. Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. **Nature Sustainability**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 290–295, 2020. DOI: 10.1038/s41893-019-0470-4. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41893-019-0470-4>.

WHATELY, Marussia; CAMPANILI, Maura. **Programa Municípios Verdes: lições aprendidas e desafios para 2013/2014**. Belém, PA: Governo do Estado, 2013.