



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



JOICE MACHADO MARTINS

**POTENCIALIDADES LOCACIONAIS PARA AS
TERMOELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL NO BIOMA
AMAZÔNIA**

JOÃO PESSOA – PB
2023

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº100

JOICE MACHADO MARTINS

**POTENCIALIDADES LOCACIONAIS PARA AS
TERMOELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL NO BIOMA
AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador

Prof. Dr. Evandro Ferreira da Silva
Coorientador

**JOÃO PESSOA
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M386p Martins, Joice Machado.

Potencialidades locacionais para as termoelétricas de base florestal no bioma Amazônia / Joice Machado Martins. - João Pessoa, 2023.

137 f. : il.

Orientação: Luiz Moreira Coelho Junior.

Coorientação: Evandro Ferreira da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia renovável. 2. Bioenergia. 3. Bioeletricidade florestal. 4. Biomassa florestal. 5. Termelétricas florestais - Bioma Amazônia. I. Coelho Junior, Luiz Moreira. II. Da Silva, Evandro Ferreira. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

JOICE MACHADO MARTINS

**POTENCIALIDADES LOCACIONAIS PARA AS
TERMOELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL NO BIOMA
AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de janeiro de 2023.

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima

UFPB

Prof. Dr. Luis Antônio Coimbra Borges

UFLA



Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior
Orientador



Prof. Dr. Evandro Ferreira da Silva
Coorientador

**JOÃO PESSOA
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e ao Universo por ter me dado força, capacidade e perseverança para continuar e terminar esta pesquisa. Também, ao meu pai, Oscar Júnior e a minha linda mãe, Maria Martins, que sempre me deram todo o suporte necessário, um dia espero retribuir tudo o que fizeram por mim. Ao meu irmão, Felipe Martins e a minha cunhada Jéssica Sandim por trazerem leveza aos meus dias e por sempre me apoiarem.

Ao meu orientador Prof. Luiz Coelho Moreira Junior que me permitiu trabalhar ao seu lado, seus ensinamentos foram muito valiosos. Um imenso obrigada ao meu coorientador Prof. Evandro Ferreira da Silva que foi essencial para que eu desenvolvesse cada passo deste estudo, suas contribuições foram de grande riqueza e utilidade.

Aos meus amigos da UFRA, especialmente a minha querida amiga Jamilly Rocha, serei eternamente agradecida pela amizade sólida que construímos. Agradeço também a UFPB e ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) que me permitiram cursar o mestrado, conhecer e aprender com professores incríveis e colaborar com colegas, foram anos muito gratificantes.

Muito obrigada a Kaise de Souza por ter tido a bondade de nos fornecer acesso ao banco de dados com informações da Amazônia que foram essenciais para a conclusão desta dissertação. Destaco também, a importância da Universidade Federal do Espírito Santo que nos concedeu o uso a distância de seus computadores e nos ajudou grandemente no processamento de dados.

Por último, porém não menos importante, agradeço de coração à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), pelo apoio financeiro na concessão de bolsa de estudos por meio o termo de outorga 046/2021. Muito obrigada por me permitir estudar e me manter em João Pessoa.

Joice Machado Martins

RESUMO

A região Amazônica exporta uma grande quantidade de madeira comercial. No processo de rendimento, aproximadamente 50% da tora vira resíduos. Uma alternativa, seria utilizar este material na geração de energia elétrica renovável – bioenergia. A fim de verificar as melhores áreas para a produção de bioenergia, este estudo analisou as potencialidades locais para as termelétricas de base florestal no bioma Amazônia. No primeiro artigo, fez-se uma revisão bibliométrica e sistemática sobre a pegada de carbono e otimização da oferta de bioeletricidade florestal. Utilizou-se as bases ISI Web of Science e Scopus para o levantamento bibliográfico, foram analisados 89 estudos. No segundo artigo, quantificou-se a biomassa acima do solo e a energia gerada com base nos resíduos do beneficiamento da madeira comercial. No terceiro, analisou-se a localização ótima para instalação de termelétricas florestais. A metodologia do segundo e terceiro artigo foi desenvolvida em ambiente SIG, no aplicativo Arcgis, versão 10.5. Os resultados demonstraram que as publicações tinham como principal temática a Otimização (76,6%) ou Estudos Ambientais (22,5%). Focaram, sobretudo, no potencial e/ou disponibilidade da biomassa florestal ou em avaliar os impactos ambientais. Os modelos de simulação e a avaliação do ciclo de vida foram as ferramentas metodológicas mais empregadas. Roraima e Amapá obtiveram a maior quantidade de biomassa acima do solo ($397,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) e ($348,3 \text{ Mg ha}^{-1}$). Isso pode ser explicado pela conservação de suas florestas e por não estarem próximos do arco do desmatamento. O Amazonas e Pará, gerariam mais energia elétrica que os demais estados (sob manejo sustentável: 13.023 MW/ano; 9.166 MW/ano e sob o potencial total: 223.772 MW/ano e 157.498 MW/ano). Roraima e Amapá apresentaram as áreas mais atrativas para a instalação de termelétricas florestais, suas usinas gerariam mais energia e operariam por mais tempo. Este estudo trouxe dados essenciais à ampliação do uso da bioenergia na Amazônia.

Palavras-chave: Energia renovável. Bioenergia. Bioeletricidade Florestal. Localização ótima

ABSTRACT

The Amazon region exports a large amount of commercial timber. In the yield process, approximately 50% of the log becomes waste. An alternative would be to use this material to generate renewable electricity – bioenergy. In order to verify the best areas for bioenergy production, this study analyzed the locational potential for forest-based thermoelectric plants in the Amazon biome. In the first article, a bibliometric and systematic review was carried out on the carbon footprint and optimization of forest bioelectricity supply. The ISI Web of Science and Scopus bases were used for the bibliographic survey, 89 studies were analyzed. In the second article, the aboveground biomass and the energy generated based on residues from commercial wood processing were quantified. In the third, the optimal location for installing forest thermoelectric plants was analyzed. The methodology of the second and third article was developed in a GIS environment, in the Arcgis application, version 10.5. The results showed that the publications had Optimization (76.6%) or Environmental Studies (22.5%) as their main theme. They focused, above all, on the potential and/or availability of forest biomass or on assessing environmental impacts. Simulation models and life cycle assessment were the most used methodological tools. Roraima and Amapá had the highest amount of aboveground biomass (397.2 Mg ha⁻¹) and (348.3 Mg ha⁻¹). This can be explained by the conservation of their forests and the fact that they are not close to the arc of deforestation. Amazonas and Pará would generate more electricity than the other states (under sustainable management: 13,023 MW/year; 9,166 MW/year and under full potential: 223,772 MW/year and 157,498 MW/year). Roraima and Amapá presented the most attractive areas for the installation of forest thermoelectric plants, their plants would generate more energy and operate longer. This study provided essential data for expanding the use of bioenergy in the Amazon.

Keywords: Renewable energy. Bioenergy. Forest Bioelectricity. Great location.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sumário descritivo da revisão sistemática de literatura.	23
Figura 2.2. Etapas da pesquisa para análise bibliométrica e revisão sistemática de estudos referentes a bioeletricidade florestal.	28
Figura 2.3. Distribuição espacial e quantidade das publicações referentes a bioeletricidade florestal, dividida por quartis, no período de 1993 a 2020.	30
Figura 2.4. Evolução anual e acumulada das publicações e citações (Artigos e Artigos de Revisão), referentes a estudos de bioeletricidade no mundo, no período de 1993 a 2020. .	30
Figura 2.5. Rede de palavras-chave associadas à bioeletricidade florestal encontradas com maior frequência nas publicações da amostra final.	31
Figura 2.6. Evolução anual das publicações considerando as temáticas de otimização e estudos ambientais referentes as produções científicas de bioeletricidade florestal.	33
Figura 3.1. Distribuição do continente América do Sul, com destaque para o Brasil. b) Bioma Amazônia em território brasileiro. c) Amostras de biomassa acima do solo disponibilizadas por Mitchard et al. (2014); Sullivan et al. (2017) e Schepaschenko et al. (2019).	59
Figura 3.2. Distribuição das florestas ombrófilas densas e abertas no bioma Amazônia ..	64
Figura 4.1. a) Distribuição do continente América do Sul, com destaque para o Brasil. b) Distribuição do bioma Amazônia em território brasileiro. c) Distribuição das amostras de biomassa acima do solo disponibilizadas por Mitchard et al. (2014); Sullivan et al. (2017) e Schepaschenko et al. (2019).	89
Figura 4.2. a) Mesorregiões do estado do Pará. b) Mesorregiões do estado do Amazonas.	90
Figura 4.3. a) Pontos correspondentes aos centros urbanos no bioma Amazônia, sendo esses, todos candidatos à instalação de termelétricas florestais. b) Distribuição das localizações potenciais para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia. c) Pontos de biomassa dispostos dentro do buffer, considerando a distância de até 50 Km das hidrografias, estradas e linhas de transmissão, os pontos foram situados a 20 Km um do outro.	102
Figura 4.4. a) e b) Localização ótima das 5 termelétricas selecionadas no bioma Amazônia com base nas áreas potenciais, considerando a distância de busca de biomassa de 50 Km e 100 Km, respectivamente. c) e d) Localização ótima das 5 termelétricas selecionadas no	

bioma Amazônia com base nas áreas urbanas, considerando a distância de busca de biomassa de 50 Km e 100 Km, respectivamente..... 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos periódicos científicos mais relevantes, considerando a quantidade de produções.	32
Tabela 2.2. Classificação das publicações quanto ao principal enfoque de pesquisa, considerando a temática de estudos ambientais.	34
Tabela 2.3. Classificação das publicações quanto ao principal enfoque de pesquisa, considerando a temática de otimização.	35
Tabela 3.1. Vetores utilizados para montagem do banco de dados visando a espacialização da biomassa acima do solo no bioma Amazônia	58
Tabela 3.2. Distribuição dos dados referentes a validação cruzada (acuracidade) e estudo do melhor modelo de interpolação para estimativa da média da biomassa florestal acima do solo (Mg ha ⁻¹) no bioma Amazônia. Foi analisado a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), EQM = Erro Quadrado Médio, %EF = Percentual de Eficiência, R ² aj = Coeficiente de determinação ajustado, r = Coeficiente de correlação, d = Índice de concordância e c = Índice de confiança.....	66
Tabela 3.3. Biomassa total acima do solo (Mg ha ⁻¹) nos estados da Amazônia Ocidental, considerando a extensão das fitofisionomias florestais.	68
Tabela 3.4. Biomassa total acima do solo (Mg ha ⁻¹) nos estados da Amazônia Oriental, considerando a extensão das fitofisionomias florestais.	70
Tabela 3.5. Geração de energia a partir dos resíduos de processamento da madeira na Amazônia Ocidental, considerando o potencial total e sob manejo florestal sustentável. ..	74
Tabela 3.6. Geração de energia a partir dos resíduos de processamento da madeira na Amazônia Oriental, considerando o potencial total e sob manejo florestal sustentável.....	76
Tabela 4.1. Restrições consideradas na instalação de usinas termelétricas de base florestal no bioma Amazônia.....	91
Tabela 4.2. Distribuição dos dados referentes a validação cruzada (acuracidade) e estudo do melhor modelo de interpolação para estimativa da média da biomassa florestal acima do solo (Mg ha ⁻¹) no bioma Amazônia. Foi analisado a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), EQM = Erro Quadrado Médio, %EF = Percentual de Eficiência, R ² aj = Coeficiente de determinação ajustado, r = Coeficiente de correlação, d = Índice de concordância e c = Índice de confiança.....	100

Tabela 4.3. Distribuição dos pontos de biomassa na Amazônia, da quantidade de usinas termelétricas à base de resíduos derivados do processamento da madeira comercial, considerando as áreas potenciais disponíveis e apenas os centros urbanos.	103
Tabela 4.4. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais na Amazônia Ocidental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.....	105
Tabela 4.5. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas na Amazônia Ocidental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	106
Tabela 4.6. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais nas mesorregiões do Amazonas, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	111
Tabela 4.7. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas nas mesorregiões do Amazonas, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	113
Tabela 4.8. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais na Amazônia Oriental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	115
Tabela 4.9. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas na Amazônia Oriental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	116
Tabela 4.10. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.	121
Tabela 4.11. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais situadas nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.....	122
Tabela 4.12. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas nas mesorregiões do Pará,	

considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.
..... 124

Tabela 4.13. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas– anos – situadas nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.
..... 125

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	ARTIGO 1 – OFERTA DE BIOELETRICIDADE FLORESTAL: UMA REVISÃO PARA MODELOS DE OTIMIZAÇÃO E PEGADA DE CARBONO	18
2.1	INTRODUÇÃO.....	20
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
2.4	CONCLUSÃO.....	41
2.5	REFERÊNCIAS	42
3	ARTIGO 2 – ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA FLORESTAL PARA BIOENERGIA NO BIOMA AMAZÔNIA	53
3.1	INTRODUÇÃO.....	55
3.2	MATERIAL E MÉTODO	57
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.4	CONCLUSÃO.....	79
3.5	REFERÊNCIAS	79
4	ARTIGO 3 – LOCALIZAÇÃO ÓTIMA PARA INSTALAÇÃO DE TERMELÉTRICAS FLORESTAIS NO BIOMA AMAZÔNIA	85
4.1	INTRODUÇÃO.....	87
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	88
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
4.4	CONCLUSÃO.....	127
4.5	REFERÊNCIAS	128
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
6	REFERÊNCIAS.....	137

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

O território brasileiro possui cerca de 500 milhões de hectares de florestas, o que representa 58,5% da sua área. Desse total, 488 milhões de hectares – 98% – é formado por vegetação natural, no qual 334 milhões de hectares – 79% – está concentrado no bioma Amazônia (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2018; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SFB, 2017, 2020).

A Amazônia estende-se por aproximadamente 4,2 milhões de km², cobrindo 49.29% do território brasileiro e 5% da superfície terrestre (SFB, 2019). A fitofisionomia florestal Ombrófila Densa é dominante na região, composta em geral por árvores altas, incluindo as variações “mata de várzea” e “matas de igapó” (SFB, 2019). Outras tipologias com grande presença é a floresta ombrófila aberta e florestas estacionais (IBGE, 2004).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA – (2008), presume-se que nessa região cresçam 2.500 espécies de árvores, isto é, um terço de toda a madeira tropical do mundo. De acordo com SFB (2019), a Amazônia possui um volume total de madeira estimado em 109.404 milhões de m³, representando 92,8% do total, considerando todos os biomas do Brasil. A biomassa total, foi calculada em 96.046 milhões de toneladas, também, respondendo por 92,8%. Martini et al. (1994) estimam cerca de 350 espécies de madeiras comerciais na região. Richardson et al. (2016) alcançou valores próximos, sendo de 314 espécies florestais.

A quantidade de madeira apta à comercialização é definida pelo volume comercial (m³ h⁻¹) que é determinado com base nas dimensões das árvores (BIAZATTI et al., 2019; BRASIL, 2009). O fuste comercial, sendo a distância entre a base da árvore e o início da copa, é o principal componente utilizado para a produção de madeira serrada (ROMERO et al., 2021).

Essa madeira, deve ser derivada do manejo florestal sustentável que consiste na administração dos bens florestais visando benefícios econômicos, sociais e ambientais. Busca-se o equilíbrio entre a retirada de recursos e a continuidade das espécies no ecossistema (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS – IBAMA, 2020). Todos os procedimentos realizados devem seguir critérios e ações pré-estabelecidas em um documento chamado Plano de Manejo Florestal Sustentável

(PMFS). Nele, deve conter informações como localização da área concedida, tipos de vegetação, de solos, rios, quantidade de madeira, ciclo de corte e área explorada por ano (IBAMA, 2020; SFB 2017).

Em 2018, estimou-se que a exploração florestal em áreas de manejo ficou em torno de 294 a 441 mil hectares (SFB, 2019). Neste mesmo ano, contabilizou-se cerca de 8,8 milhões de m³ de madeira em tora extraída de floresta natural na Amazônia para fins industriais (LENTINI et al, 2019). O sistema de manejo utilizado na Amazônia é o policíclico que utiliza um ciclo de corte de 25-35 anos, para uma intensidade de corte máxima de 30 m³h⁻¹ (SFB, 2019).

Ao deixar a floresta, a madeira segue para o processo de rendimento que consiste na relação entre o volume de madeira serrada e o volume da tora antes do processo de serragem, expresso em porcentagem (STEELE, 1984). Devido à falta de investimentos em equipamentos, capacitação e em matérias-primas de qualidade, o rendimento operacional na Amazônia é baixo, por isso, são gerados uma grande quantidade de resíduos com pó, serragens e pedaços de madeira (RUIVO; JARDIM, 2007).

Na Amazônia, no período de 2007 a 2017, explorou-se um volume de 81.002.042,5 m³ de madeira em tora (ANDRADE et al., 2022). Feitosa (2008) menciona que apenas 35% de cada tora é transformada em produto serrado, os outros 65% é desperdiçado. Para Ferreira, Carrasco e Helmeister (1989), somente 40% da madeira é transformada em produto serrado, os 60% restantes são resíduos, enquanto para Rocha (2002) o rendimento pode alcançar 55% a 65%.

Em 2018 a Empresa de Pesquisa Energética – EPE – publicou uma nota técnica com o intuito de incentivar o uso de resíduos florestais no setor energético, bem como, de informar sobre o volume gerado na Amazônia. Desse modo, em uma área de 29.308.715 ha o potencial de madeira em tora seria de 21.102.275 m³ e o total de resíduo gerado ficou em torno de 10.973.183 toneladas.

A utilização dos resíduos do processamento da madeira para bioenergia pode ser uma alternativa interessante na Amazônia. Essa energia renovável é proveniente da transformação da biomassa em energia elétrica, térmica e biocombustíveis (HUGHES; PARTZSCH; GASKELL, 2006). A biomassa, por sua vez é todo material biológico produzido direta ou indiretamente pela fotossíntese (IEA BIOENERGY, 2021). Alguns exemplos são a madeira e resíduos de madeira, resíduos agrícolas (colheita, processamento e/ou resíduo animal), resíduos de arboricultura, resíduo de esgoto e plantações para fins

energéticos (IEA BIOENERGY, 2021; FERREIRA et al., 2018; MAHESH; SHOBA; JASMIN, 2013; WELFLE, 2017).

Ela é a terceira energia renovável mais utilizada o mundo, representa em média, 13% do consumo (WORLD BIOENERGY ASSOCIATION – WBA, 2020). Em 2017, respondeu por 25% da produção de eletricidade, gerando 598 TWh (WBA, 2019). Já em 2018, a produção foi de 637 TWh. Considerando o período de 2000 a 2018, observou-se um percentual de crescimento de 8% (WBA, 2020).

O incentivo à utilização de fontes limpas de energia é promovido pela Organização das Nações Unidas por meio do objetivo 7 da Agenda 2030 (UNITED NATIONS, 2022). As energias limpas emitem menos poluentes, geram menos impactos ambientais, apresentam maior quantidade de fontes, promovem o desenvolvimento econômico e diversificam a matriz elétrica de uma localidade (REN21, 2019; SAIDI; OMRI, 2020;). Na Amazônia existem inúmeras áreas de difícil acesso, na qual o fornecimento elétrico é inexistente ou realizado com limites. Segundo o Governo Brasileiro (2020), aproximadamente 82.000 famílias (350.000 pessoas) ainda vivem sem eletricidade nessas áreas.

A matriz elétrica dos estados amazônicos é formada, sobretudo, por usinas hidrelétricas. De 45.354 MW da potência outorgada na Amazônia, 35.774 MW é proveniente desses empreendimentos. As termelétricas, que utilizam, principalmente, o óleo diesel, vêm em seguida, com 7.466 MW. O restante é composto pela pequena participação de energias renováveis, como eólica e solar (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2022).

As termelétricas de resíduos florestais representam apenas 0,32% da geração de energia elétrica. Em 2022, de 662 usinas em operação, 606 operavam com combustíveis fósseis como o óleo diesel. Desse total, somente 56 referiam-se a biomassa florestal e apenas 22 faziam uso de resíduos florestais, dentre eles, os derivados do processamento da madeira (ANEEL, 2022).

Quantificar e analisar a espacialização da biomassa florestal no bioma Amazônia é de extrema importância para a gestão e controle deste recurso. Além disso, permite observar as melhores áreas para a instalação de termelétricas florestais com base na disponibilidade e potencial elétrico gerado. Diante ao exposto, o objetivo deste estudo foi analisar as potencialidades locais para as termelétricas de base florestal no bioma Amazônia. Para isso, dividiu-se esta dissertação em três artigos científicos. No primeiro, foi realizada uma revisão, por meio de uma análise bibliométrica e revisão sistemática de literatura, sobre a

pegada de carbono e otimização da oferta da bioeletricidade florestal. No capítulo dois, analisou-se a disponibilidade de biomassa florestal acima do solo sob manejo florestal sustentável para bioenergia no bioma Amazônia. Considerou-se a fitofisionomia predominante na região, isto é, as florestas Ombrófilas. Por fim, no terceiro artigo, analisou-se a localização ótima para instalação de termelétricas florestais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as potencialidades locacionais para as termoelétricas de base florestal no bioma Amazônia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliométrica e sistemática de literatura sobre a pegada de carbono e otimização da oferta de bioeletricidade florestal.
- Analisar a disponibilidade de biomassa florestal para bioenergia no bioma Amazônia.
- Analisar a localização ótima para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia.

2 ARTIGO 1 – OFERTA DE BIOELETRICIDADE FLORESTAL: UMA REVISÃO PARA MODELOS DE OTIMIZAÇÃO E PEGADA DE CARBONO

RESUMO

A bioenergia florestal é importante para complementar o suprimento energético mundial e atuar na mitigação das emissões dos gases do efeito estufa. Seguindo o objetivo 7 da Agenda 2020 da ONU que incentiva o uso de energias limpas de fácil acesso, este artigo realizou uma revisão, por meio da análise bibliométrica e revisão sistemática, da pegada de carbono e otimização da oferta de bioeletricidade florestal. Para o levantamento das publicações usou-se os bancos de dados *ISI Web of Knowledge* e *Scopus*. As análises realizadas foram: palavras-chaves, publicações por países, principais periódicos e evolução anual das publicações. Os estudos foram classificados, na Análise de Conteúdo, quanto a temática, ao enfoque da pesquisa e as ferramentas metodológicas predominantes. Os resultados mostraram que no período de 1993 a 2020, houveram 89 estudos referentes a bioeletricidade florestal, destacando-se os anos de 2011 e 2015. O Canadá e os Estados Unidos foram os países mais atuantes, publicando 39 estudos. Otimização, com 69 artigos, e Estudos Ambientais, com 20, foram as duas temáticas predominantes. As publicações de otimização concentraram-se em três enfoques: Potencial e/ou disponibilidade de biomassa florestal, Gerenciamento da cadeia de abastecimento da biomassa e Localização ótima para instalação de termelétricas. Nos Estudos Ambientais foram: avaliação de impactos ambientais e legislação para a bioenergia. Os modelos de simulação, pesquisa bibliográfica e avaliação do ciclo de vida foram as ferramentas metodológicas predominantes. Este estudo contribuiu trazendo um mapeamento dos tópicos e tendências de pesquisa mais importantes sobre bioenergia florestal.

Palavras-chave: Bioeletricidade. Pegada de Carbono. Revisão sistemática.

FOREST BIOELECTRICITY SUPPLY: A REVIEW OF OPTIMIZATION MODELS AND CARBON FOOTPRINT

ABSTRACT

Forest bioenergy is important to complement the world's energy supply and act in the mitigation of greenhouse gas emissions. Following objective 7 of the UN Agenda 2020, which encourages the use of easily accessible clean energies, this article carried out a review, through bibliometric analysis and systematic review, of the carbon footprint and optimization of the supply of forest bioelectricity. To survey the publications, the ISI Web of Knowledge and Scopus databases were used. The analyzes carried out were: keywords, publications by country, main journals and annual evolution of publications. The studies were classified, in the Content Analysis, according to the theme, the focus of the research and the predominant methodological tools. The results showed that in the period from 1993 to 2020, there were 89 studies related to forest bioelectricity, highlighting the years 2011 and 2015. Canada and the United States were the most active countries, publishing 39 studies. Optimization, with 69 articles, and Environmental Studies, with 20, were the two predominant themes. Optimization publications focused on three approaches: Potential and/or availability of forest biomass, Management of the biomass supply chain and Optimal location for installing thermoelectric plants. In Environmental Studies were: assessment of environmental impacts and legislation for bioenergy. Simulation models, bibliographic research and life cycle assessment were the predominant methodological tools. This study contributed by mapping the most important topics and research trends on forest bioenergy.

Keywords: Bioelectricity. Carbon footprint. Systematic review.

2.1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, as preocupações sobre o papel dos combustíveis fósseis na emissão de dióxido de carbono e outros gases do efeito estufa – GEE – ganhou força (COVERT; GREENSTONE; KNITTEL, 2016). Hoje, sabe-se que cerca de 65% das emissões globais de GEE são geradas pela combustão de tais recursos e que nos últimos 20 anos eles representaram mais de 80% da matriz elétrica mundial (PACHAURI; MEYER, 2014; KUMBHAR, 2022). A dependência dos combustíveis fósseis gerou inúmeros impactos ambientais no planeta, além disso, contribuiu significativamente para o avanço do aquecimento global (MARTINS et al., 2019).

Em 2015, 195 países e a União Europeia se comprometeram em deter o aumento da temperatura do planeta abaixo de 2°C até o ano de 2100. Este pacto recebeu o nome de “Acordo de Paris”, ocorreu na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas – COP21 – e entrou em vigor em 2020, substituindo o protocolo de Kyoto (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2018; LIU, 2021). Entre as principais metas, estão a redução das emissões de GEE por meio da transição da matriz energética para fontes renováveis. O fornecimento de energias renováveis e de fácil acesso também foi incentivado pela Agenda 2030, por meio do objetivo 7. Este acordo global foi promovido pela Organização das Nações Unidas, na qual formulou-se metas para alcançar o desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2022).

A bioenergia apresenta um bom potencial para somar à matriz energética mundial junto as demais fontes renováveis. Ela é gerada a partir da conversão da biomassa em eletricidade, energia térmica ou biocombustíveis (MERCANTE, 2021; GONÇALVES; MALICO; SOUSA, 2021). A biomassa, é toda matéria orgânica animal ou vegetal como os resíduos da floresta, resíduos sólidos, estrume animal e esgoto humano (JUNGINGER et al., 2019; US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2022). Ela é classificada em sólida, líquida ou gasosa, sendo que a sólida é dominante para geração de energia elétrica. Essa categoria abrange as toras, cavacos, pellets e cascas de madeira, além de subprodutos de serraria, da indústria do papel e celulose, resíduos de madeira e de culturas agrícolas (YU et al., 2021).

A área florestal de países como o Brasil (488 milhões de hectares) Canadá (362 milhões de hectares) e Estados Unidos (305 milhões de hectares), torna o uso da bioeletricidade a partir de resíduos florestais interessante. Proporciona uma destinação

ambientalmente adequada para o pó e serragem gerados na fase de beneficiamento – transformação da madeira bruta em aplainada (GOVERNMENT OF CANADA, 2022; *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO*, 2020; PENA-VERGARA, 2022; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SFB, 2017). Para produzir eletricidade, os resíduos são queimados em uma caldeira que origina vapor de alta pressão. Esse vapor, é utilizado para movimentar turbinas que com a sua rotação, acionam um gerador, produzindo energia. Tal processo ocorre em empreendimentos denominados usinas termelétricas (REN; ZHOU; QIAN, 2021).

Mesmo utilizando a combustão direta para geração de energia, a bioenergia florestal é considerada neutra na emissão de carbono. Durante a sua vida, por meio da fotossíntese, as árvores absorvem CO_2 da atmosfera – “sequestro” – e ao ocorrer a queima para bioeletricidade, é liberado apenas o que foi absorvido anteriormente (FAHRIYE ENDA; KARAOSMANOGLU, 2021). Desse modo, a concentração de carbono permanece inalterada (MATUŠTÍK; KOČÍ, 2022; YOKOYAMA; MATSUMURA, 2008). A pegada de carbono contabiliza a emissão de GEE ao longo de um processo ou atividade, podendo atestar a sua neutralidade ou a sua contribuição para o aquecimento global (PETERS, 2010). No contexto da atual mudança climática, a avaliação do armazenamento de carbono é um dos os objetivos mais importantes do manejo florestal, pois está diretamente ligada à avaliação de combustíveis e bioenergia (AFFLECK, 2019).

Fahriye Enda e Karaosmanoglu (2021) trouxeram uma revisão na qual mostraram as principais etapas da cadeia de abastecimento de biomassa florestal e estudaram a pegada de carbono em cada uma. Seguindo uma metodologia parecida, Rafael et al. (2015) também realizaram o balanço de GEE na cadeia da bioenergia. De La Fuente et al. (2017) avaliaram as emissões de GEE associadas à combustão de combustíveis fósseis utilizados em operações florestais, transporte e picagem de biomassa florestal.

No estágio atual, a implantação da bioenergia tem potencial para mitigar as mudanças climáticas, mas também apresenta riscos consideráveis (COMBER, 2015). A sua produção requer o uso de combustíveis fósseis para o transporte e causa impactos ambientais em inúmeras fases da cadeia de abastecimento (LI; WANG; YAN, 2018). A obtenção bioenergia é desafiadora e algumas problemáticas persistem, entre elas, tem-se a qualidade da biomassa para energia e o seu potencial de queima, localizações estratégicas que avaliem a distância da matéria-prima, mão de obra, polo consumidor e central de geração. A quantidade de biomassa disponível para atender uma termelétrica ou uma região, o tempo de transporte

entre o polo consumidor e gerador, o barateamento da matéria-prima e das etapas do processo de energia e a logística da cadeia de abastecimento que consiste na organização do transporte, armazenamento e distribuição. As análises que buscam tornar a bioenergia mais competitiva melhorando os processos descritos acima, utilizam técnicas de otimização.

Os estudos de otimização apresentam uma análise técnica e/ou econômica, embasada em programação matemática que maximiza ou minimiza um objeto de estudo (ALONSO; DEL VALLE; RAMIREZ, 2020). Segundo Leal (2017) otimizar algo consiste em procurar uma função que forneça o máximo benefício segundo algum critério, ou seja, é a busca de uma condição ótima (a melhor solução de todas as soluções viáveis).

Entre os estudos de otimização, Liu, Lin e Yeh (2017) elaboraram um modelo de programação linear inteira mista com o objetivo de determinar as estratégias ótimas de produção, maximizando o lucro e minimizando o custo das emissões de carbono na geração de energia elétrica e calor. As vantagens da coprodução são a possibilidade de compartilhamento de equipamentos e instalações, a redução de custos de investimentos e a dispersão dos riscos que envolvem as matérias-primas, gerando sinergia. Shu et al. (2022) apresentaram um novo método de estimativa, envolvendo estatística e geoprocessamento, proporcionando maior confiabilidade e segurança ao quantificar a disponibilidade de biomassa florestal.

Analisar de forma sistemática as metodologias utilizadas em publicações de bioenergia florestal é de grande necessidade para evidenciar os pontos fortes e fracos dessa área. Por isso, o objetivo deste estudo foi realizar uma revisão, por meio da análise bibliométrica e revisão sistemática, sobre a pegada de carbono e otimização da oferta de bioeletricidade.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para gerar informações relevantes em uma área é importante que a bibliografia seja analisada de forma criteriosa. Nesse sentido, o emprego da revisão sistemática é de grande utilidade. Segundo Kitchenham (2004) a revisão sistemática é um método de identificação, avaliação e interpretação de todas as pesquisas disponíveis que sejam relevantes para um estudo. É caracterizada como um estudo secundário que se baseia em análises de estudos primários. A bibliometria é empregada como uma das principais ferramentas para analisar a bibliografia disponível. Ela caracteriza-se por realizar uma análise sistemática da literatura, apresentando como ponto principal o uso de métodos matemáticos e estatísticos para medir

as inter-relações e impactos de publicações (CHUEKE, 2015; COOK et al., 1997; FERRARI et al., 2020; GLANZEL, 2003; LEE et al., 2020). Seguindo a orientação de Tranfield; Denyer e Smart, (2003), a revisão sistemática de literatura – RSL – do presente estudo foi organizada da seguinte forma: Planejamento da revisão (exploratória), condução da revisão (desenvolvimento) e relatório de divulgação (análise), como exposto na Figura 2.1.

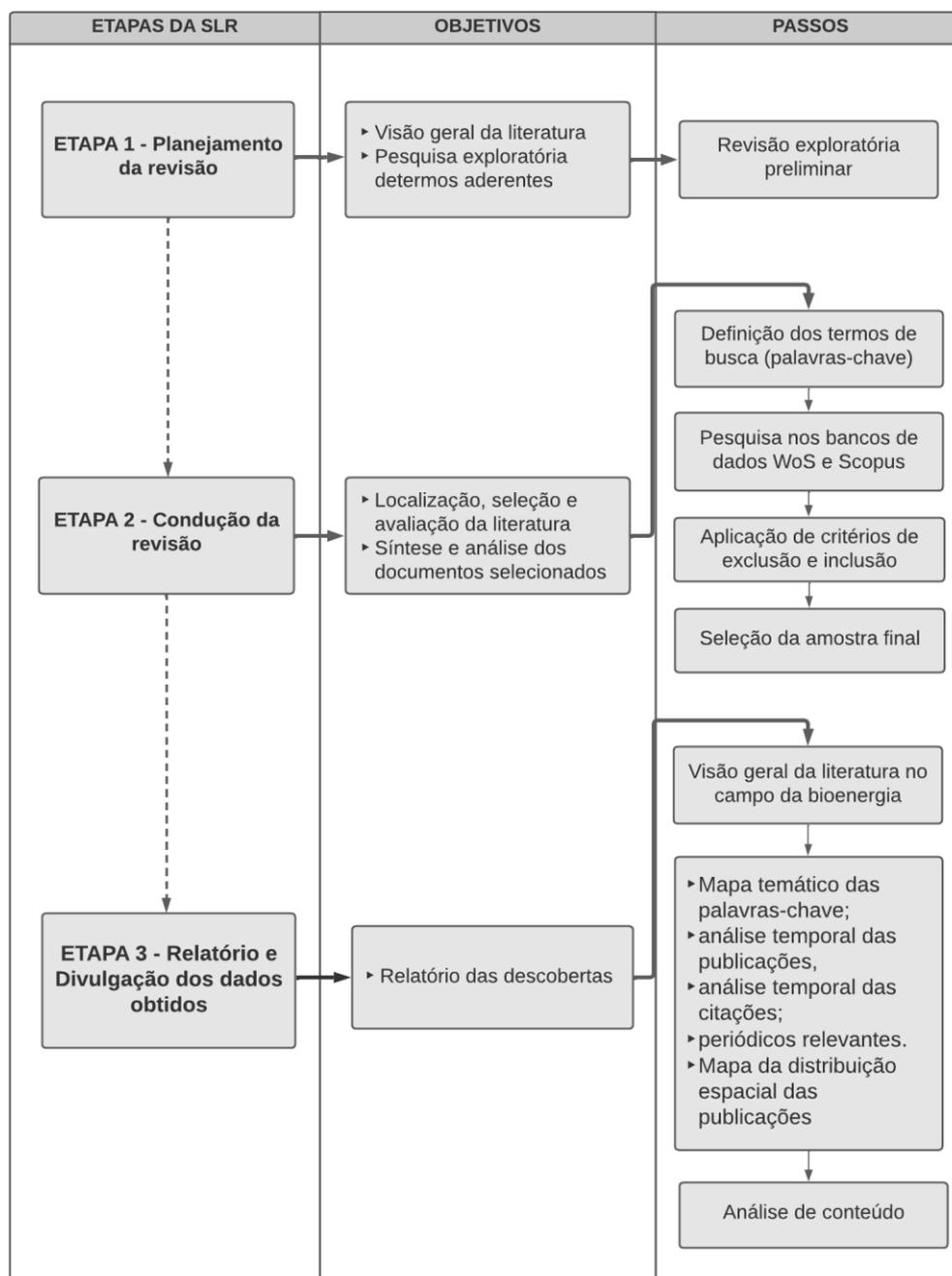


Figura 2.1. Sumário descritivo da revisão sistemática de literatura.

Fonte: Adaptado de Tranfield; Denyer; Smart, 2003.

- **Etapa 1: Planejamento da revisão**

Com o intuito de observar os termos mais recorrentes nos artigos de bioeletricidade e pegada de carbono, fez-se uma pesquisa exploratória não estruturada na plataforma *Google Scholar*. Por conseguinte, definiu-se os termos de busca e seus sinônimos, permitindo que o presente estudo seja relevante e aderente aos estudos já existentes. Tranfield; Denyer e Smart (2003) destacam a importância do estudo prévio na fase exploratória para delimitar a área de estudo e a plataforma de pesquisa a ser escolhida.

- **Etapa 2: Condução da revisão**

Os bancos de dados escolhidos para a realização da pesquisa foram o *ISI Web of Science* (WoS) e Scopus. Wang e Waltman (2016) mencionam que estes são os bancos de dados mais importantes e prestigiados do mundo. Para a realização da Revisão Sistemática de Literatura, foram definidas as seguintes palavras-chave: “power Generation”, “power generation plant”, “forest”, “biomass”, “bioenergy”, “footprint” e “supply”.

Dois pesquisas foram realizadas utilizando a mesma configuração. Para a pesquisa 1, utilizou-se a procura em tópicos na linha 1 (“power Generation” or “power generation plant”) e em títulos na linha 2 (“forest” and “biomass” or “bioenergy”). Enquanto para a pesquisa 2, empregou-se a busca por títulos tanto na linha 1 (“forest” and “biomass” or “bioenergy”) quanto na linha 2 (“footprint” or “supply”). A busca por tópicos é mais abrangente uma vez que procura as palavras-chave em títulos, resumos e palavras-chave. Já a pesquisa considerando somente os títulos é limitada, por isso, as bases retornam um volume menor de estudos. O somatório da pesquisa totalizou 1.112 artigos.

Tranfield; Denyer e Smart (2003) aconselham que para a etapa de extração de dados, os pesquisadores analisem quais informações serão necessárias para projetar tabelas de resumos e sintetizar as informações dos estudos. Deve-se gerar um formulário com os artigos resultantes, incluindo informações técnicas e adicionando-se novos dados. Somente os artigos que atenderem a todos os critérios presentes no protocolo de revisão e que não manifestarem nenhum dos critérios de exclusão podem ser inclusos na revisão.

Visando a permanência na amostra apenas dos estudos com abordagem em bioeletricidade florestal e pegada de carbono, aplicou-se restrições. Primeiramente, foi selecionado as áreas de aderência, utilizou-se o critério de equivalência, pois os bancos de dados não possuem áreas idênticas, nesta etapa foram excluídos 66 artigos, permanecendo

1.046 na amostra. Os arquivos resultantes foram unidos em uma planilha no ambiente de desenvolvimento integrado do programa R, denominado *Rstudio*, onde os documentos duplicados foram excluídos (296), sobrando 750.

Delimitou-se a amostra quanto ao tipo de documento, selecionou-se apenas artigos e artigos de revisão, 126 estudos foram eliminados, restando 624. Apenas artigos escritos em inglês ficaram na amostra, excluindo-se 23. Por conseguinte, empregou-se o método de aderência ao tema por meio da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, onde excluiu-se 501 documentos, permanecendo, 100. Na última análise, que consistiu na leitura dos textos completos, eliminou-se 11 estudos, restando 89 documentos para serem analisados na amostra final. Ensslin et al. (2017) e Tranfield et al. (2003) afirmaram que, para selecionar a amostra final, é necessário realizar análises buscando consonância com o tema da pesquisa por meio dos títulos, resumos e alinhamento completo dos artigos.

As bases de dados fornecem todas as informações necessárias de um estudo, como ano, autores, palavras-chave, revista de publicação, idioma e resumo. Para a análise de conteúdo, complementou-se, manualmente, com informações como a origem dos autores, temática da pesquisa, enfoque e ferramentas utilizadas em suas metodologias. A análise de conteúdo possibilita uma pesquisa mais flexível e é altamente empregada quando se busca uma abordagem sistemática e rigorosa para analisar dados obtidos ou gerados durante um estudo (WHITE; MARSH, 2006).

- **Etapa 3: Relatório dos dados obtidos**

Os resultados foram apresentados por meio da análise bibliométrica e da análise de conteúdo. Os indicadores bibliométricos utilizados foram: evolução anual das publicações e citações, quantidade de publicação por país, classificação dos periódicos segundo o seu Fator de Impacto (FI) e mapa temático de palavras-chave.

A evolução anual das publicações e citações foi analisada considerando a quantidade anual e acumulada de artigos e artigos de revisão. Para a espacialização das pesquisas, agrupou-se a quantidade de estudos por países em quartis, considerando a origem de cada autor. Quartis são valores que dividem uma amostra de dados em quatro partes aproximadamente iguais (FREUND; PERLES, 1987; PEREZ-VICENTE; RUIZ, 2009). O mapa dos países foi elaborado no *Software Gratuito e de Linguagem Aberta de Sistema de Informação Geográfica QGIS*, versão 3.16.1. A tabela de periódicos e o mapa de palavras-

chave foram elaborados no *Software VosViewer* 1.6.11, contou-se apenas os termos que compareceram 5 vezes ou mais na amostra final.

A tabela contendo os periódicos de maior relevância considerou a quantidade de publicações por revista e o seu FI – indicador bibliométrico que avalia importância das publicações com base no número de citações (CLARIVATE ANALYTICS, 2018). O número de citações recebidas no ano do cálculo do FI é dividido pela quantidade de artigos publicados nos dois anos antecedentes ao cálculo, e o valor final é incorporado ao *Journal Citation Report (JCR)* para consulta (CLARIVATE ANALYTICS, 2018; GARFIELD, 1994; GARFIELD, 1999).

- **Análise de Conteúdo**

Dentre as definições de Análise de Conteúdo, para Krippendorff (1980), é uma técnica de pesquisa utilizada para obter inferências válidas e replicáveis dos dados em seu contexto. Para Borelson (1952), refere-se a uma técnica quantitativa, onde o pesquisador possui um leque de ocorrências relevantes, também, deve ser sistemática uma vez que todos os aspectos importantes devem ser notados e contabilizados pelo pesquisador. Por fim, a análise de conteúdo deve ser objetiva, isto é, as unidades selecionadas para análise e formação de categorias devem ser, claramente, definidas segundo algum critério.

Para sistematizar os resultados, os estudos foram organizados, por meio de uma análise indutiva – avaliação de dados por meio da observação – em uma estrutura de entabulamento, agrupando-os segundo suas informações em comum (KIM, 2021). Ao ler principalmente o título, resumo e palavras-chave, dividiu-se os trabalhos quanto às duas temáticas predominantes observadas na amostra final: otimização e estudos ambientais.

Ao focar nos objetivos e metodologia, as publicações foram classificadas quanto ao enfoque da pesquisa – área de evidência. Para otimização, notou-se a predominância de três: potencial e ou/disponibilidade de biomassa florestal, localização ótima para instalação de termelétricas e otimização da cadeia de abastecimento da biomassa. Os estudos ambientais concentraram-se em avaliação de impactos ambientais e legislação ambiental para bioeletricidade.

Os estudos de potencial e/ou disponibilidade de biomassa concentram-se em calcular o volume disponível desse recurso para bioenergia, considerando o estoque potencial ou sob manejo florestal sustentável. As publicações relacionadas ao gerenciamento da cadeia de

abastecimento estudam a logística, o planejamento e a gestão das etapas da geração de bioenergia. As análises de localização ótima para instalação de usinas termelétricas, caracterizaram-se por analisar o cenário econômico, ambiental e social do projeto, para assim, tomar as melhores decisões de alocação.

A avaliação de impacto ambiental (AIA) relaciona um conjunto de métodos e técnicas reconhecidas de gestão ambiental que visam identificar, prognosticar e avaliar os efeitos e os impactos que determinadas atividades e empreendimentos causam sobre o meio ambiente (IAIA, 1999). O enfoque legislação ambiental visa compreender leis, decretos, resoluções, portarias que regem o uso da bioenergia florestal. Tais legislações permitem o estímulo e o controle da bioeletricidade por meio de incentivos governamentais e parâmetros para utilização.

Por fim, as publicações foram organizadas segundo as ferramentas metodológicas observadas. Nos estudos de otimização, observou-se a predominância do SIG, dos modelos de simulação e da pesquisa bibliográfica. Miranda (2010), define SIG – Sistema de Informações Geográficas – como um sistema de computador que coleciona, edita, integra e analisa informações relacionadas à superfície da terra. Os modelos de simulação buscam simular a operação de um sistema, através de ferramentas computacionais (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). São desenvolvidos e aplicados para representar e imitar as principais características, funções, operações e comportamentos de um sistema, tarefas ou processos do mundo real (BALAMAN, 2019). A pesquisa bibliográfica consiste no levantamento ou revisão de dados para a coleta de informações. Fornecem conceitos, classificações e metodologias da pesquisa científica (ÇAPARLAR; DÖNMEZ, 2016).

Os estudos ambientais foram classificados em modelos de simulação, pesquisa bibliográfica e avaliação do ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia científica utilizada para avaliar os impactos ambientais envolvendo todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade. Objetiva identificar e quantificar os fluxos de energia, isto é, as entradas e saídas de um sistema, por meio da realização de um inventário. A partir da análise desse fluxo, avaliar os impactos ambientais gerados em cada etapa e interpretar tais resultados. A ACV ajuda a identificar oportunidades para melhorar os desempenhos ambientais de um objeto estudado e configura-se como uma poderosa ferramenta para planejamento estratégico, tornando a bioenergia mais eficiente (CHAU; LEUNG, 2015; NBR 14040, 2001).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2.2 observa-se a configuração da revisão sistemática de literatura. Após a aplicação de uma série de critérios, restou-se 89 documentos, na amostra final, para análise.

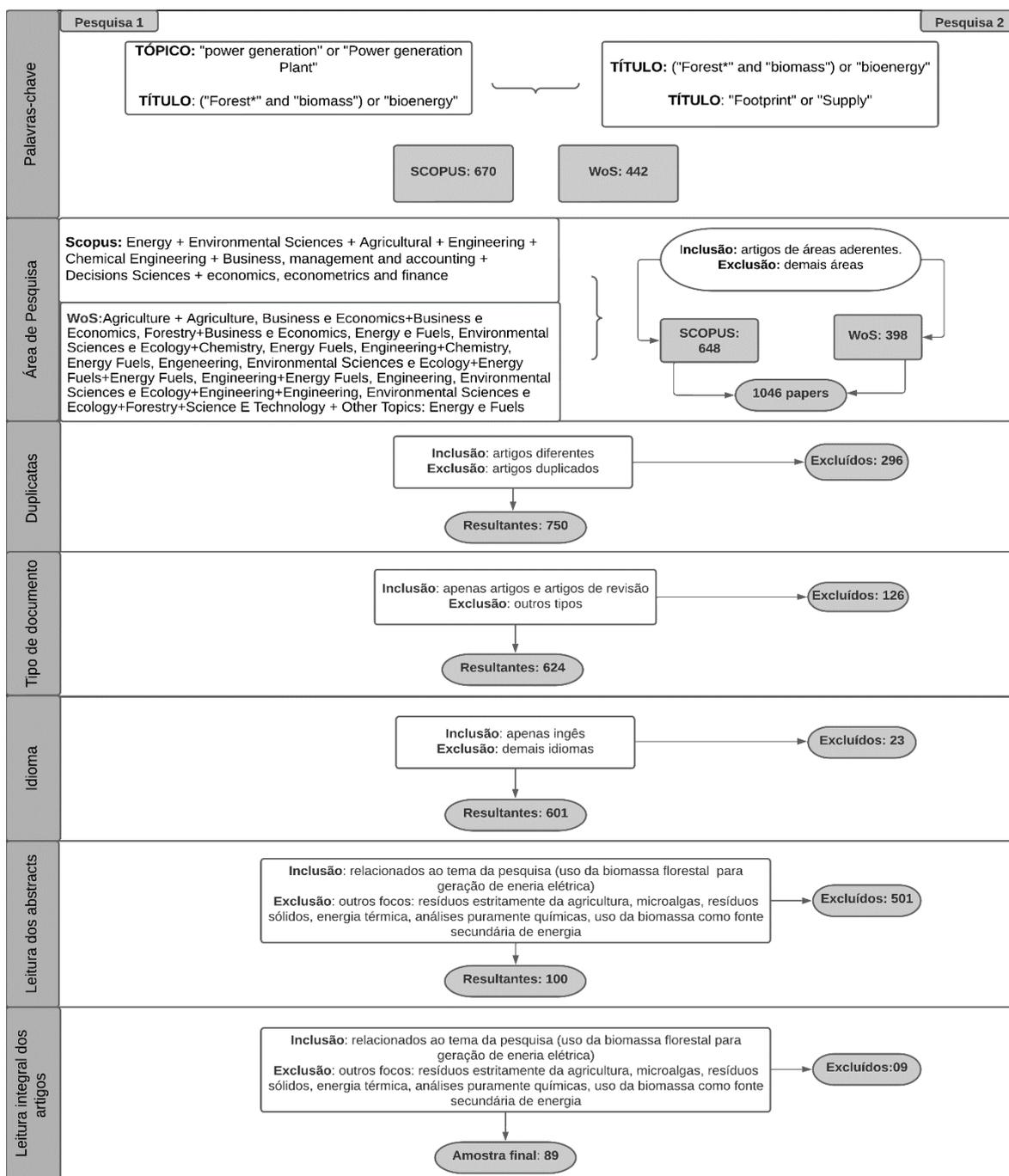


Figura 2.2. Etapas da pesquisa para análise bibliométrica e revisão sistemática de estudos referentes a bioeletricidade florestal.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Figura 2.3 vê-se a distribuição espacial da origem dos autores, contou-se 27 países. Em 79% dos estudos, os autores pertenciam ao mesmo país, enquanto em 21% houve colaborações entre dois ou mais países. A colaboração internacional é essencial uma vez que permite a parceria entre instituições de ensino, dando mais visibilidade e relevância a um artigo científico (ALONSO, 2016).

No Q1, os países com maior destaque foram Alemanha, Austrália, Austria e Itália que participaram de 4 artigos cada um. Seguidos de Brasil, Irlanda e Reino Unido com 3 estudos, os outros países compareceram com 2 artigos ou menos. O Q1 concentrou 20 países e 41 artigos, representando 33% da amostra.

O país com o melhor resultado no Q2 foi a Finlândia com 10 publicações. China apareceu com 8, Portugal e Japão com 7. Ao todo, para o Q2, contou-se 32 produções, abrangendo 26% do total.

O Q3 abarcou somente a Suécia com 11 estudos (9%). No último quartil, os Estados Unidos estiveram presente juntamente com o Canadá, obtendo 18 e 21 produções, respectivamente, e somando 39 artigos, representando 32% da amostra.

A considerável influência de países europeus em pesquisas sobre bioenergia é assegurada pelo *Eurostat Statistic Explained* (2019), eles mencionam que Portugal, Finlândia e Suécia estiveram entre os líderes europeus no consumo de energias renováveis, dentre elas, a bioenergia, no ano de 2019.

Ao analisar os continentes, a Europa obteve a maior participação, concentrando 17 países e 60 produções científicas, respondendo por 49% da amostra analisada. A América do Norte veio em seguida com Canadá e Estados Unidos, somando 39 artigos (ou 32% do total). A Ásia foi o terceiro continente com a maior relevância, contou-se 6 países e 19 estudos científicos, correspondendo a 15% do total. Esses resultados também são reforçados pelas análises dos últimos anos. Segundo a REN21 (2020), nas últimas décadas o crescimento da bioenergia tem se concentrado na Europa, Ásia e América do Norte.

Em 2019, a Ásia foi a maior produtora de bioeletricidade, gerando 225 TWh, um aumento de 17% em relação a 2018, quase metade dessa geração foi produzida na China. A Europa ocupou a segunda posição, com geração de 200 TWh, sendo a Alemanha o país líder local. Representando a América do Norte, nos Estados Unidos houve uma queda de 2% na geração de bioeletricidade, totalizando 76 TWh, no entanto, ainda é um forte concorrente (REN21, 2020).

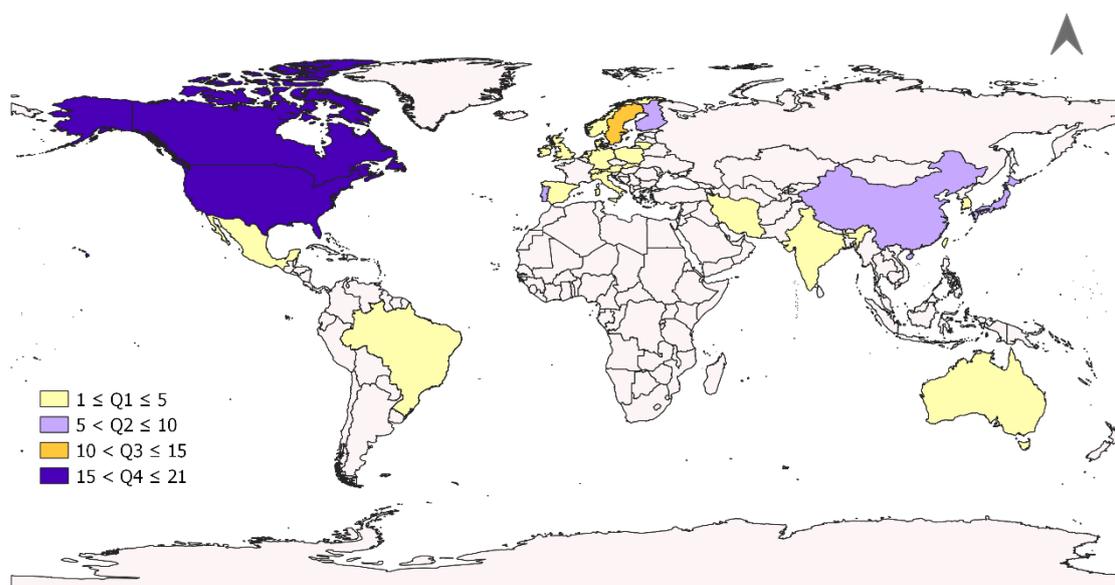


Figura 2.3. Distribuição espacial e quantidade das publicações referentes a bioeletricidade florestal, dividida por quartis, no período de 1993 a 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Figura 2.4 vê-se a evolução anual e acumulada das publicações e citações. Contabilizou-se 84 artigos e 5 artigos de revisão, totalizando 89 publicações distribuídas em 49 periódicos. Os estudos abrangeram o período de 1993 a 2020.

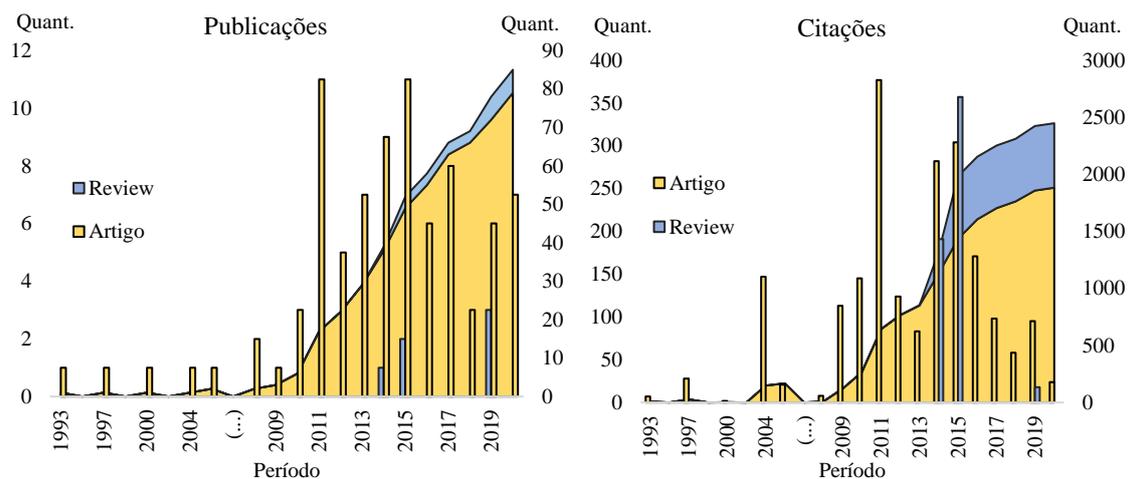


Figura 2.4. Evolução anual e acumulada das publicações e citações (Artigos e Artigos de Revisão), referentes a estudos de bioeletricidade no mundo, no período de 1993 a 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Destacou-se como o termo mais recorrente a palavra “biomassa” aparecendo 72 vezes, seguido de “silvicultura” com 54, “bienergia” com 51 e “cadeia de abastecimento” com 28. Observou-se também o termo “geração de energia” citado 24 vezes, seguida de “custos” que apareceu 22 vezes. As outras palavras foram citadas menos de 20 vezes.

A Tabela 2.1 concentra os periódicos mais relevantes segundo a quantidade de publicações e seus respectivos valores de Fator de Impacto. A revista *Biomass and Bioenergy* obteve a maior quantidade de publicações, 12 artigos, citados 496 vezes, seu fator de impacto é de FI = 5,061. A segunda revista com mais participações foi a *Applied Energy* com 8 documentos e 501 citações. Esse periódico, apresentou a maior quantidade de citações e o maior fator de impacto observado na amostra final, FI = 9,746, evidenciando a sua grande relevância no cenário acadêmico. A segunda revista com o melhor FI correspondeu a *Journal of Cleaner Production*, sendo de 9.297. Bloch (2002) afirma que o número de citações tem sido amplamente aceito como um indicador do impacto de um artigo. Em geral, os melhores artigos são publicados em revistas revisadas por pares com fatores de alto impacto (ROBINSON; CALLEN, 2010).

Tabela 2.1. Classificação dos periódicos científicos mais relevantes, considerando a quantidade de produções.

Periódicos	Quant.	Citações	FI
Biomass and Bioenergy	12	496	5,061
Applied Energy	8	501	9,746
Energy	6	169	7,147
Forests	4	46	2,633
Forest ecology and management	3	205	3,558
GCB Bioenergy	3	357	4,745
Scandinavian Journal of Forest Research	3	34	2,433
Croatian Journal of Forest Engineering	3	36	2,088
Energy Policy	3	96	6,142
Journal of Cleaner Production	3	152	9.297

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

As análises de otimização compreenderam 69 publicações, representando 77,6% do total, contou-se 64 artigos e 5 artigos de revisão, citados 1856 vezes. O Canadá foi o país de maior representatividade, com 17 produções, seguido dos Estados Unidos, com 14. Os estudos ambientais responderam por 22,4%. Contabilizou-se 20 artigos científicos, citados

508 vezes. Canadá e Portugal foram as localidades de maior destaque com 3 estudos, cada um.

Na Figura 2.6 vê-se a evolução anual das publicações considerando as temáticas de pesquisa. Foi observado que de 1993 até 2009, publicou-se apenas artigos de otimização, com média de 1 estudo ao ano. Apenas em 2010, foi escrito o primeiro documento sobre estudos ambientais, mostrando um atraso de mais de 10 anos. Para otimização, o ano de maior destaque foi 2019, com 9 produções, seguido de 2011 com 8 e 2015 com 7. A média para o período da amostra (1993-2020) foi de 4 publicações por ano. Para os estudos ambientais, os anos com melhores resultados foram 2015 com 6 publicações, 2011 e 2020 com 3 estudos cada um. Considerando o período de 2010 até 2020, a média obtida foi de 2 estudos ao ano.

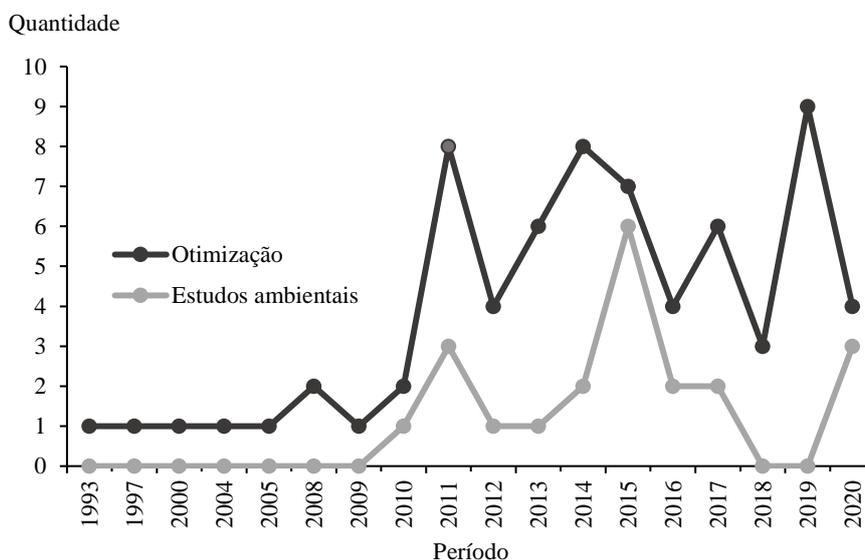


Figura 2.6. Evolução anual das publicações considerando as temáticas de otimização e estudos ambientais referentes as produções científicas de bioeletricidade florestal. Considerou-se o período de 1993 a 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Tabela 2.2 traz a classificação dos estudos ambientais quanto ao enfoque principal de pesquisa. Para essa temática, dividiu-se os estudos em: avaliação de impactos ambientais, e Legislação ambiental para bioenergia. O enfoque avaliação de impactos ambientais abrangeu 19 estudos (95%) e 456 citações. A produção de maior destaque foi a de Thakur; Canter e Kumar (2014), citados 74 vezes. Os autores avaliaram a energia de entrada e emissões de GEE em dois cenários para geração de bioenergia no Canadá. A primeira opção

envolveu a coleta de resíduos, empilhamento, lascamento na beira da estrada (desembarque) e transporte dos cavacos para a usina. A segunda opção envolveu a coleta de resíduos, empilhamento, empacotamento, transporte dos cavacos para a usina, e lascamento na planta. Eles consideraram a potência máxima de 300 MW. Concluiu-se que as emissões de GEE foram notadas em plantas de energia de 10 a 300 MW. Em centrais com capacidade elétrica superior a 30 MW, a etapa de transporte foi a mais poluente e a mais cara. Desse modo, a primeira opção, com o processo de lascamento feito no pátio da indústria, precisou de menos energia, e, portanto, obteve menor emissão de GEE.

Tabela 2.2. Classificação das publicações quanto ao principal enfoque de pesquisa, considerando a temática de estudos ambientais.

Estudos ambientais			
Enfoque de pesquisa	Quantidade	%	Citações
Avaliação de impactos ambientais	19	95	456
Legislação ambiental para bioenergia	1	5	2
Total	20	100	535

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O enfoque legislação ambiental para bioenergia abrangeu apenas o estudo de Barnett (2016). O autor menciona que o Reino Unido impulsiona o uso da biomassa florestal devido ao compromisso mundial de combater as mudanças climáticas fazendo uso de energias renováveis. Para não haver uma superexploração, são necessários programas de manejo florestal. Desse modo, o objetivo do estudo foi revisar a decisão do Reino Unido de usar os programas de certificação ambiental para bioenergia como um mecanismo para obter biomassa sustentável para produção de bioenergia.

Os artigos de otimização seguiram três enfoques: Potencial e/ou a disponibilidade de biomassa florestal, Otimização da cadeia de abastecimento da biomassa florestal e Localização ótima para instalação de termelétricas, como vê-se na Tabela 2.3.

O enfoque que abarcou o maior número de produções foi o de potencial e/ou disponibilidade de biomassa florestal, contou-se 40 publicações, citadas 944 vezes e representaram 57,9% do total. O estudo mais vezes citado (130 vezes) foi o de Viana et al. (2010). Os autores mencionaram que em Portugal 13 novas usinas termelétricas com um total de 86.4 MW estão em construção. O potencial de biomassa necessário para atendê-las

foi avaliado, por meio de ferramentas SIG. Utilizou-se um cenário para cogeração e um apenas para geração de energia elétrica. Concluiu-se que se for gerada apenas eletricidade, algumas regiões precisarão de combustíveis alternativos para atender a demanda. Mas, se a cogeração for implementada, o volume de madeira disponível será suficiente para atender a demanda requerida.

Tabela 2.3. Classificação das publicações quanto ao principal enfoque de pesquisa, considerando a temática de otimização.

Otimização			
Enfoque de pesquisa	Quantidade	%	Citações
Potencial e/ou disponibilidade de biomassa florestal	42	61%	970
Otimização da cadeia de abastecimento da biomassa	23	33,3%	719
Localização ótima para instalação de termelétricas	4	5,7%	221
Total	69	100	1.910

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A otimização da cadeia de abastecimento da biomassa florestal abrangeu 24 produções (34,8% do total) e 654 citações. Cambero e Sowlati (2014), citados 191 vezes, produziram uma revisão de literatura evidenciando os principais indicadores de avaliação e otimização da cadeia de bioenergia e verificaram a relação entre aspectos econômicos, sociais e ambientais. Concluiu-se que as emissões de GEE é o indicador ambiental mais utilizado na literatura, os custos de produção da bioenergia é o principal objeto de estudo entre os aspectos econômicos e a geração de emprego é a ferramenta mais empregada no critério social.

Para localização ótima, contou-se 5 produções (representando 7,3% do total), com 258 citações. A publicação de maior relevância correspondeu ao estudo de Freppaz et al. (2004), na qual foi implementado um sistema de suporte a decisão, utilizando SIG e programação matemática para analisar a localização ótima de 6 usinas que deveriam estar situadas em Savona, na Itália, o tempo de operação seria de 20 anos. Desse modo, o sistema analisou as localidades e qual seria a potência ideal das usinas, considerando a disponibilidade de biomassa florestal ao redor, a densidade populacional e quanto elas iriam requerer de energia. Além disso, incluiu-se também, aspectos econômicos, sociais, ambientais e técnicos para alcançar os melhores resultados.

O Quadro 2.1 representa a distribuição das ferramentas metodológicas considerando a temática de estudos ambientais. Para a avaliação de impactos ambientais, observou-se a predominância do emprego da avaliação do ciclo de vida, modelos de simulação e pesquisa bibliográfica. Para o enfoque de legislação ambiental, observou-se apenas a pesquisa bibliográfica como ferramenta metodológica utilizada.

Enfoque	Ferramentas Metodológicas	Autores	Citação	Qtde
Avaliação de Impactos Ambientais	ACV	Thakur, Canter e Kumar (2014)	74	11
		Gustavsson et al. (2015)	71	
		Murphy, Devlin e McDonnell (2014)	43	
		Valente, Hillring e Solberg (2011)	22	
		Pyörälä, Kellomki e Peltola (2012)	20	
		Cleary e Caspersen (2015)	17	
		Ahmadi, Kannangara e Bensebaa (2020)	9	
		De La Fuente et al. (2017)	7	
		Sgarbossa et al. (2020)	5	
		Rafael et al. (2015)	4	
		Da Costa et al. (2020)	1	
	Modelos de Simulação	Repo et al. (2015)	46	8
		Abt Abt K, Abt C e Galik (2012)	43	
		Myllyviita et al. (2013)	43	
		Borjesson, Pettersson e Ahlgren (2016)	36	
		Rafael et al. (2015)	32	
		Savaz et al. (2020)	25	
		Schmidt et al. (2011)	16	
	Murphy e McDonnell (2017)	15		
Legislação Ambiental	Pesquisa Bibliográfica	Barnet (2016)	6	1

Quadro 2.1. Principais ferramentas observadas nas metodologias dos Estudos Ambientais.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Contou 11 produções abordando ACV, citadas 273 vezes. O trabalho mais vezes citado (74 vezes), foi o de Thakur, Canter e Kumar (2014). Visto que este estudo já foi explicado anteriormente, o segundo estudo de maior destaque será abordado a seguir.

Gustavsson et al. (2015), citados 71 vezes, visaram comparar as emissões de CO²

derivados dos processos da bioenergia e dos combustíveis fósseis através de uma ACV. O intuito desta comparação foi observar se a bioenergia é viável para substituir os combustíveis fósseis na eletricidade e no setor de transportes. Os resultados mostraram que a bioenergia, se usado de forma eficiente, promove maiores benefícios. Quanto aos benefícios climáticos, eles serão consideráveis dependendo do combustível fóssil a ser substituído e na eficiência das tecnologias empregadas na conversão de energia. A bioenergia apresentou teores maiores de emissão de CO₂ no setor de transporte. Por isso, visando um uso mais eficiente, os autores recomendaram o seu uso em carros elétricos, assim, seria emitido menos carbono.

Quanto aos estudos que empregaram modelos de simulação, a publicação mais relevante foi o trabalho de Repo et al. (2015), citados 46 vezes. Os autores utilizaram um modelo de simulação para avaliar a redução dos estoques de resíduos florestais e de carbono no solo, em toda a Europa. Isso foi realizado uma vez que uma grande quantidade de recurso florestal pode ser retirada da floresta, alterando as concentrações de carbono, considerando o período de 2016 a 2100. Como resultado destas emissões relacionadas ao uso da terra, a produção de bioenergia precisa ser continuada por 60-80 anos para atingir uma redução de emissão de 60 % de CO₂. Além disso, observou-se também que a curto prazo não se notou uma redução significativa de CO₂ ao empregar a bioenergia, no entanto, a longo prazo, essa forma de energia pode trazer resultados satisfatórios. Ressalta-se que o estudo referente a temática de legislação ambiental (Barnet (2016) foi previamente exposto acima.

Nas metodologias dos estudos de otimização observou-se as seguintes ferramentas: Sistema de Informação Geográfica – SIG, modelo de simulação e pesquisa bibliográfica. No Quadro 2.2 vê-se a distribuição das publicações, representadas pelos autores, na temática de Otimização e que empregaram em suas metodologias tais ferramentas.

Quadro 2.2. Principais ferramentas observadas nas metodologias dos estudos de otimização da bioenergia florestal.

Enfoque	Ferramentas metodológicas	Autores	Citação	Qtde
Potencial e/ou Disponibilidade de biomassa	SIG	Viana et al. (2010)	147	10
		Yoshioka e Sakai (2005)	21	
		Cao et al. (2014)	18	
		Cozzi et al. (2013)	15	
		Alam, Pulkki e Shahi (2012)	14	
		Aruga et al. (2014)	5	

		Athanassiadis e Nodfjell (2017)	3	
		Pari et al. (2013)	1	
		Tatsuara (2020)	0	
		Battuvshin et al. (2020)	1	
	SIG e Modelo de Simulação	Aruga et al. (2013)	113	6
		Bouchard, Landry e Gagnon (2013)	16	
		Joelsson et al. (2016)	7	
		Fu et al. (2020)	7	
		Antilla et al. (2015)	5	
		Galik, ABT e Wu (2009)	4	
	Modelo de simulação	Verkerk et al. (2011)	119	17
		Mobini, Sowlati e sokhansanj (2011)	71	
		Brjesson, Hansson e Berndes (2017)	46	
		Yemshanov et al. (2014)	40	
		Lundmark, Athanassiadis e Wetterlund (2015)	35	
		Paré et al. (2011)	35	
		Aguilar; Cai e D'amato (2014)	29	
		Sosa et al. (2015)	29	
		Yagi e Nakata (2011)	27	
		Akhtari, Sowlati e Day (2014)	17	
Stasko et al. (2011)		15		
Costanza, ABT e Mickerrow (2015)		11		
Bostedt, Mustonen e Gong (2016)		7		
Guo, Hodges e ABT (2011)		6		
Markowski et al. (2012)		6		
Helynen (2000)		2		
Aalto, Korpinen e Ranta (2019)	1			
Pesquisa bibliográfica	Sedjo (1997)	28	9	
	Peura e Hyttinen (2011)	22		
	White (2010)	15		
	Mabee, Mirck and Chandra (2011)	8		
	Bodlund e Bergman (1993)	7		
	Zhang, Zuo e Bai (2008)	4		
	Aruga et al. (2011)	9		
	Strandgard et al. (2019)	4		
	Zhang et al. (2013)	0		
Otimização da cadeia de abastecimento da biomassa	Modelo de simulação	Shabani e Sowlati (2016)	71	19
		Cambero et al. (2015)	68	
		Shabani, Sowlati e Ouhimmou (2014)	55	
		Cambero, Sowlati e Pavel (2016)	52	
		Paulo et al. (2015)	44	

		Cardoso, Silva e Eusebio (2019)	29	
		Akhtari, Sowlati e Griess (2018)	27	
		Deboni et al. (2019)	19	
		Razm, Nickel e Sahebi (2019)	17	
		Akhtari, Sowlati e Siller-Benitez (2019)	13	
		Abbas et al. (2013)	11	
		Li et al. (2017)	10	
		Liu, Lin e Yeh (2017)	8	
		Flores Hernandez, Jaeger e Islas (2017)	7	
		Akhtari e Sowlati (2020)	4	
		Nicholls, Monserud e Dykstra (2008)	4	
		Korpunen e Raiko (2014)	1	
		Zhang et al. (2017)	0	
		Zhang et al. (2010)	0	
		Pesquisa Bibliográfica	Carnbero e Sowlati (2014)	
Acuna et al. (2019)	37			
Kurka, Efferies e Blackwood (2012)	12			
Woo et al. (2019)	2			
Localização ótima	SIG	Freppaz et al. (2004)	147	4
		Comber et al. (2015)	43	
		Teixeira et al. (2018)	21	
		Guilhermino et al. (2018)	10	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para o enfoque de disponibilidade de biomassa contou-se 10 publicações que empregaram o SIG em sua metodologia, com um total de 225 citações. O estudo de Viana et al. (2010), foi o mais citado, 147 vezes. Em Portugal 13 novas centrais com um total de 86.4 MW estão em construção. O potencial de biomassa necessário para atender tais usinas foi avaliado e quantificado por meio de ferramentas SIG. Utilizou-se um cenário para cogeração e um apenas para geração de energia elétrica. Concluiu-se que se for gerada apenas eletricidade, algumas regiões precisarão de combustíveis alternativos para atender a demanda. Mas, se a cogeração for implementada, o volume de madeira disponível será suficiente para atender a demanda requerida.

As produções que utilizam SIG e modelo de simulação totalizaram 6, com 152 citações. O documento de Aruga et al. (2013), foi o de maior destaque, citado 113 vezes. Nele, verificou-se a estimativa do volume anual de biomassa disponível para bioenergia, por meio de SIG. Incluiu-se modelos econômicos sobre a despesa da colheita e do reflorestamento, sob manejo florestal sustentável. Concluiu-se que as despesas de

reflorestamento tiveram grandes impactos negativos sobre os saldos financeiros das operações da bioenergia.

Os modelos de simulação obtiveram a maior quantidade de documentos (17) e de citação (496). O estudo de maior relevância foi o de Verkerk et al. (2011), citados 119 vezes, cujo objetivo foi estimar o potencial de oferta de biomassa florestal nos membros da União Europeia, no período de 2010 a 2030. Calculou o potencial total e o potencial sob restrições ambientais, técnicas e sociais. Para a estimativa, utilizou-se o Modelo SCENario (EFISCEN) que possui todas as informações florestais da área. Segundo projeções da EFISCEN, a biomassa teórica potencial das florestas europeias em 2010 foi de 1.277 milhões de m³ ano⁻¹ e 1.254 milhões de m³ ano⁻¹ em 2030.

As produções de pesquisa bibliográfica totalizando 9 documentos e 97 citações. O estudo principal, citado 28 vezes, correspondeu a pesquisa de Sedjo (1997). O autor fez uma exploração preliminar da economia da bioenergia, avaliando o consumo total de energia em países desenvolvidos que poderia ser economicamente satisfeita pela biomassa e comparou, com dados da literatura, a bioenergia com os combustíveis fósseis. Os resultados obtidos revelaram que um esquema de florestamento global em grande escala envolvendo 460 milhões de hectares poderia impedir a evolução do aquecimento global. Em relação aos custos, a maioria das estimativas indicam que o processo da bioenergia em grande parte do mundo é muito cara para competir com os combustíveis fósseis.

Abrangendo o enfoque Otimização da cadeia de abastecimento da biomassa, os modelos de simulação foram a principal ferramenta metodológica utilizada, estiveram presentes em 19 estudos que foram citados 440 vezes. Shabani e Sowlati (2016), sendo o estudo mais vezes citado (71 vezes), elaboraram um modelo para otimizar a cadeia de abastecimento da biomassa visando reduzir os custos do quilowatt-hora da bioenergia. Este modelo analisou o planejamento de uma termelétrica ao longo de um ano, incorporando técnicas de incerteza, como a umidade da biomassa. Os resultados mostraram que a demanda de biomassa não seria atendida todos os anos, pois a disponibilidade pode ser afetada pela qualidade, isto é, se o teor de umidade for considerável, o lucro vai diminuir.

Considerando a pesquisa bibliográfica, observou-se 4 publicações, acumulando 242 citações. O estudo mais relevante foi o de Acuna et al. (2019), citados 37 vezes, essa revisão trouxe uma contribuição abrangente e concisa dos vários métodos quantitativos, em particular técnicas de otimização, para o gerenciamento e controle eficiente de cadeias de abastecimento de biomassa. O estudo é estruturado em torno de uma abordagem de

planejamento hierárquico de cima para baixo que inclui decisões estratégicas, táticas e operacionais. A cada nível de planejamento, a revisão apresenta e analisa o problema a ser resolvido, os métodos de solução (otimização) e os vários aspectos a serem considerados para a implementação e seu uso bem sucedido.

Para o enfoque de Localização ótima, contou 4 produções, com 221 citações. A publicação de maior destaque correspondeu ao estudo de Comber et al. (2015), citados 43 vezes. Os autores determinaram os melhores locais para termelétricas, considerando a distribuição espacial da matéria-prima e da população local, além de uma gama de restrições visando alcançar os pontos de melhor desempenho.

2.4 CONCLUSÃO

Este estudo forneceu uma revisão sobre pegada de carbono e otimização da oferta da bioeletricidade florestal. A evolução anual das publicações mostrou a predominância dos artigos científicos uma vez que somente este tipo de documento foi publicado de 1993 a 2013. As análises de revisão não apresentaram grande relevância dentro da amostra final, observou-se este tipo de publicação somente em três anos diferentes. Os países de maior participação na quantidade de trabalhos foram Canadá e Estados Unidos. As palavras-chave mais utilizadas foram “biomassa”, “silvicultura”, “bienergia” e “cadeia de abastecimento”. A revista de maior destaque, considerado a quantidade publicação, foi a *Biomass and Bioenergy*, com 12 artigos citados 496 vezes. Na análise de conteúdo, encontrou-se duas temáticas predominantes: otimização e estudos ambientais. As produções de otimização apresentaram três enfoques principais de pesquisa: o potencial e/ou a disponibilidade de biomassa florestal; otimização da cadeia de abastecimento e localização ótima para instalação de termelétricas. Os estudos ambientais abrangeram duas: avaliação de impactos ambientais e legislação ambiental para bioenergia. As principais ferramentas metodológicas nos estudos de otimização foram os modelos de simulação, as ferramentas de SIG e a pesquisa bibliográfica. Para os estudos ambientais foram avaliação do ciclo de vida, modelos de simulação e pesquisa bibliográfica. Esse estudo foi de grande importância no meio acadêmico e na comunidade como um todo, pois demonstrou quais as localidades que mais contribuem com pesquisas em bioenergia, por meio das palavras-chave, puderam-se observar os principais pontos de interesse, também evidenciou os periódicos mais atrativos. A análise de conteúdo leva os autores diretamente para as áreas específicas da pesquisa, permitindo mais produções e impulsionando a competitividade da bioenergia. Tais

informações poderão ser utilizadas futuramente por outros autores e instituições, enriquecendo suas pesquisas.

2.5 REFERÊNCIAS

AALTO, M. KORPINEN O.; RANTA T. Feedstock availability and moisture 42plied42 data processing for multi-year simulation of forest biomass supply in energy production. **Silva Fenn**, v. 53, 2019.

ABBAS, D. *et al.* Cost analysis of forest biomass supply chain logistics. **Journal of Forestry**, v. 111, n. 4, p. 271-281, 2013.

ABT, K. L.; ABT, R. C.; GALIK, C. Effect of bioenergy demands and supply response on markets, 42plied, and land use. **Forest Science**, v. 58, n. 5, p. 523-539, 2012.

ACUNA, M. *et al.* Methods to manage and optimize forest biomass supply chains: A review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 124-141, 2019.

AFFLECK, D. L. R. Aboveground biomass equations for the predominant conifer species of the Inland Northwest USA. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 179-188, 2019.

AGUILAR, F. X.; CAI, Z.; D'AMATO, A. W. Non-industrial private forest owner's willingness-to-harvest: How higher timber prices influence woody biomass supply. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, p. 202-215, 2014.

AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in 42plied credit markets: A life cycle perspective. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, p. 100627, 2020.

AKHTARI, S.; SOWLATI, T. Hybrid optimization-simulation for integrated planning of bioenergy and biofuel supply chains. **Applied Energy**, v. 259, p. 114124, 2020.

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; SILLER-BENITEZ, D. 42plied42l inventory management on demand fulfilment, cost and emission of forest-based biomass supply chains using simulation modelling. **Biosystems Engineering**, v. 178, p. 184-199, 2019.

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; GRIESS, V. C. Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider 42plie-term supply and demand variations. **Applied Energy**, v. 213, p. 626-638, 2018

AKHTARI, S.; SOWLATI, T.; DAY, K. The effects of variations in supply accessibility and amount on the economics of using regional forest biomass for generating district heat. **Energy**, v. 67, p. 631-640, 2014.

ALAM, M. B.; PULKKI, R.; SHAHI, C. Woody biomass availability for bioenergy production using forest depletion spatial data in northwestern Ontario. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 42, n. 3, p. 506-516, 2012.

ALONSO, A. A. *et al.* A bibliometric analysis of collaboration between Brazil and Spain in the field of medical research from 2002 to 2011. **Investigación bibliotecológica**, v. 30, n. 69, p. 205-230, 2016.

ALONSO, G.; DEL VALLE, E.; RAMIREZ, J R. **Desalination in Nuclear Power Plants**. Woodhead Publishing, 2020.

ANDRADE, R. T. G. de. **A pegada de carbono como um dos indicadores de sustentabilidade para medição da responsabilidade socioambiental empresarial: um estudo de caso na unidade sede da Petrobras em Natal-RN**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

ANTTILA, P. *et al.* Availability, supply technology and costs of residual forest biomass for energy—A case study in 43ppplied43 China. **Biomass and bioenergy**, v. 83, p. 224-232, 2015.

ARUGA, K. *et al.* Discussion on economic and energy balances of forest biomass utilization for small-scale power 43ppplied43143 in Kanuma, Tochigi prefecture, Japan. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 32, n. 2, p. 571-586, 2011.

ARUGA, K. *et al.* A model to estimate available timber and forest biomass and reforestation expenses in a mountainous region in Japan. **Journal of forestry research**, v. 24, n. 2, p. 345-356, 2013.

ARUGA, K. *et al.* Estimating annual available amounts of forest biomass resources with total revenues and costs during the 60-year rotation in a mountainous region in Japan. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 35, n. 2, p. 125-138, 2014.

ATHANASSIADIS, D.; NORDFJELL, T. Regional GIS-based evaluation of the potential and supply costs of forest biomass in Sweden. **Frontiers**, v. 4, 2017.

BALAMAN, S. Y. Decision-making for biomass-based production chains. **The Basic Concepts and Methodologies**, p. 46-47, 2019.

BARNETT, B. H. Evaluation of the UK's use of SFM standards to procure solid woody biomass for electricity 43ppplied43143 using sustainable bioenergy criteria. **Biofuels**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2016.

BATTUVSHIN, B. *et al.* Supply potential and annual availability of timber and forest biomass resources for energy considering inter-prefectural trade in Japan. **Land Use Policy**, v. 97, p. 104780, 2020.

BHASKARAN, V. Research methods for social work. **New Delhi: Rawat**, p. 173-193, 2008.

BERELSON, B. **Content analysis in communication research**. 1952.

BLOCH, S. 'And the winners are': the top articles of 2001. **Australian & New Zealand Journal of Psychiatry**, v. 36, n. 2, p. 157-157, 2002.

BODLUND, B.; BERGMAN, J. Bioenergy in Sweden: Potential, technology, and application. **Bioresource technology**, v. 46, n. 1-2, p. 31-36, 1993.

BORJESSON, H. M.; PETTERSSON, K.; AHLGREN, E. O. Bioenergy futures in Sweden—Modeling integration scenarios for biofuel production. **Energy**, v. 109, p. 1026-1039, 2016.

BOSTEDT, G.; MUSTONEN, M.; GONG, P. Increasing forest biomass supply in Northern Europe—Countrywide estimates and economic perspectives. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 3, p. 314-322, 2016.

BOUCHARD, S.; LANDRY, M.; GAGNON, Y. Methodology for the large scale assessment of the technical power potential of forest biomass: Application to the province of New Brunswick, Canada. **Biomass and Bioenergy**, v. 54, p. 1-17, 2013.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives—A review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 62-73, 2014.

CAMBERO, C. *et al.* Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 4, p. 439-452, 2015.

CAMBERO, C.; SOWLATI, T.; PAVEL, M. Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 107, p. 218-235, 2016.

CAO, L. *et al.* Mapping above-and below-ground biomass 44pplied44l44u in subtropical forests using small-footprint LiDAR. **Forests**, v. 5, n. 6, p. 1356-1373, 2014.

ÇAPARLAR, C. Ö.; DÖNMEZ, A. What is scientific research and how can it be done? **Turkish journal of anaesthesiology and reanimation**, v. 44, n. 4, p. 212, 2016.

CARDOSO, J.; SILVA, V.; EUSÉBIO, D. Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 741-753, 2019.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle 44pplied emissions assessment on buildings. **Applied energy**, v. 143, p. 395-413, 2015.

CHUEKE, G. V; AMATUCCI, M. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. **Internext**, v. 10, n. 2, p. 1-5, 2015.

Clarivate Analytics. (2018). 2017 Journal impact factor. Journal Citation Reports Science Edition. Disponível em: <http://ipscience-help.thomsonreuters.com/incitesLiveJCR/JCRGroup/jcrOverview>. Acesso em: 08 jun 2022.

CLEARY, J.; CASPERSEN, J. P. Comparing the life cycle impacts of using 45pplied residue as feedstock for small-and large-scale bioenergy systems (part I). **Energy**, v. 88, p. 917-926, 2015

COMBER, A. *et al.* Locating bioenergy facilities using a modified GIS-based location–allocation-algorithm: Considering the spatial distribution of resource supply. **Applied Energy**, v. 154, p. 309-316, 2015

COOK, D. J.; MULROW, C. D.; HAYNES, R. B. Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. **Annals of internal medicine**, v. 126, n. 5, p. 376-380, 1997.

COSTANZA, J. ABT R; MCKERROW. Linking state-and-transition simulation and timber supply models for forest biomass production scenarios. **AIMS Environmental Science**, v. 2, n. 2, p. 180-202, 2015.

COVERT, T; GREENSTONE, M; KNITTEL, C. R. Will we ever stop using fossil fuels? **Journal of Economic Perspectives**, v. 30, n. 1, p. 117-38, 2016.

COZZI, M. *et al.* Use of forest residues for 45pplied45 forest biomass supply chains: technical and economic analysis of the production process. **Forests**, v. 4, n. 4, p. 1121-1140, 2013.

CREUTZIG, F. *et al.* Bioenergy and climate change mitigation: há assessment. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 5, p. 916-944, 2015.

DA COSTA. *et al.* Environmental comparison of forest biomass residues application in Portugal: Electricity, heat and biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110302, 2020.

DEBONI, T. L. *et al.* Evolution of the quality of forest biomass for energy 45pplied45145 in a cogeneration plant. **Renewable energy**, v. 135, p. 1291-1302, 2019.

DE LA FUENTE, T. *et al.* Fuel consumption and GHG emissions of forest biomass supply chains in Northern Sweden: a comparison analysis between integrated and conventional supply chains. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 32, n. 7, p. 568-581, 2017.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S.R.; DUTRA, A.; NUNES, N.A., REIS, C. BPM governance: a literature analysis of performance evaluation. **Bus. Process Manag. J**, v. 23, p. 71–86, 2017. doi:10.1108/BPMJ-11-2015-0159. 2017.

EUROSTAT STATISTIC EXPLAINED. **Renewable Energy Statistics**. 2019. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#:~:text=In%202019%2C%20renewable%20energy%20represented,27%20reached%208.9%20%25%20in%202019. Acesso em: 29 out. 2020.

FAHRIYE ENDA, T; KARAOSMANOGLU, F. Supply chain network carbon footprint of forest biomass to biorefinery. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, n. 2, p. 124-141, 2021.

FERRARI, G. *et al.* Bibliometric Analysis of Trends in Biomass for Bioenergy Research. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 3714, 2020.

FLORES H. U.; JAEGER, D.; ISLAS, S. J. Bioenergy potential and utilization costs for the supply of forest woody biomass for energetic use at a regional scale in Mexico. **Energies**, v. 10, n. 8, p. 1192, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Disponível em: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/há/>. Acesso em: 29 out. 2020.

FREPPAZ, D. *et al.* Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 1, p. 15-25, 2004.

FREUND, J. E.; PERLES, B. M. A new look at quartiles of ungrouped data. **The American Statistician**, v. 41, n. 3, p. 200-203, 1987.

FU, T. *et al.* Estimation of the quantity and availability of forestry residue for bioenergy production in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, p. 104993, 2020

GALIK, C. S.; ABT, R.; WU, Y. Forest biomass supply in the southeastern United States—implications for industrial roundwood and bioenergy production. **Journal of Forestry**, v. 107, n. 2, p. 69-77, 2009.

GARFIELD, E. Journal impact 46ppli: a brief review. **Cmaj**, v. 161, n. 8, p. 979-980, 1999.

GARFIELD, E. *et al.* The impact factor. **Current contents**, v. 25, n. 20, p. 3-7, 1994.

GLANZEL, W. **Bibliometrics as a research field a course on theory and application of bibliometric indicators**. 2003.

GONÇALVES, A. C.; MALICO, I.; SOUSA, A, M, O. Energy production from forest biomass: An overview. **Forest Biomass-From Trees to Energy**, 2021.

GOVERNMENT OF CANADA. How much forest does Canada have?. 2022. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests/state-canadas-forests-report/how-much-forest-does-canada-have/17601>. Acesso em: 06 jan. 2023.

GUILHERMINO, A. *et al.* Assessment of the use of forest biomass residues for bioenergy in Alto Alentejo, Portugal: logistics, economic and financial perspectives. **Waste and biomass valorization**, v. 9, n. 5, p. 739-753, 2018.

GUO, Z.; HODGES, D. G.; ABT, R. C. Forest biomass supply for bioenergy production and its impacts on roundwood markets in Tennessee. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 35, n. 2, p. 80-86, 2011.

GUSTAVSSON, L. *et al.* Climate effects of bioenergy from forest residues in comparison to 47pplied energy. **Applied Energy**, v. 138, p. 36-50, 2015.

HA, ABNT NBR. 14040: Gestão ambiental-Avaliação do ciclo de vida-Princípios e estrutura. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2001.

HELYNEN, S. *et al.* Production and consumption potentials for bioenergy in Finland to the year 2010. **VTT Publications**, n. 404, 1999.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.

IEA BIOENERGY. **Bioenerg Countries' Report – update 2021 Implementation of bioenergy in the IEA Bioenergy member countries**. 2021. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountriesReport2021_final.pdf. Acesso em: 05 junho de 2022.

IEA BIOENERGY. Is energy from woody biomass positive for the climate?. 2021. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/FAQ_WoodyBiomass-Climate_final-1.pdf. Acesso em: 13 nov 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, et al. Mitigation of climate change. **Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment 47pplied47 the Intergovernmental Panel on Climate Change**, v. 1454, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global warming of 1.5° C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Bioenergy**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/bioenergy>. Acesso em: 1 Jul. 2021.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020: Analisis and forecast to 2025**.

JACSÓ, P. Google Scholar Metrics for Publications: The software and 47pplied47 features of a new open access bibliometric 47pplied47. **Online information review**, 2012.

JOELSSON, J. *et al.* Integrated supply of stemwood and residual biomass to forest-based biorefineries. **International Journal of Forest Engineering**, v. 27, n. 2, p. 115-138, 2016.

JUNGINGER, H. M. et al. The future of biomass and bioenergy deployment and trade: a synthesis of 15 years IEA Bioenergy Task 40 on sustainable bioenergy trade. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 2, p. 247-266, 2019.

KIM, S. M. Inductive or deductive? Research by maxillofacial surgeons. **Journal of the Korean Association of Oral and Maxillofacial Surgeons**, v. 47, n. 3, p. 151-152, 2021.

KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. 2004, p. 1-26, 2004.

KORPUNEN, H.; RAIKO, R. Testing activity-based costing to large-scale combined heat and power plant using bioenergy. **International 48pplie of energy research**, v. 38, n. 3, p. 339-349, 2014.

KRIPPENDORFF, K. **Content analysis: An introduction to its methodology**. Sage publications, 2018.

KUMBHAR, V. *et al.* Application of biodiesel for 12-cylinder, supercharged military combat vehicle. **International Journal of Ambient Energy**, v. 43, n. 1, p. 1959-1965, 2022.

KURKA, T.; JEFFERIES, C.; BLACKWOOD, D. GIS-based location suitability of decentralized, 48pplie scale bioenergy developments to estimate transport CO2 emissions and costs. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 366-379, 2012.

LEAL, P. C. **Um estudo sobre otimização de funções reais de várias variáveis: teoria e aplicações**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LEE, I. *et al.* Bibliometric analysis of research assessing the use of acupuncture for pain treatment over the past 20 years. **Journal of Pain Research**, v. 13, p. 367, 2020.

LI, J.; WANG, Y.; YAN, B. The hotspots of life cycle assessment for bioenergy: A review by social network analysis. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1301-1308, 2018.

LI, Y. *et al.* Economic impact of combined torrefaction and pelletization processes on forestry biomass supply. **Gcb Bioenergy**, v. 9, n. 4, p. 681-693, 2017.

LIU, W.; LIN, C.; YEH, T. Supply chain optimization of forest biomass electricity and bioethanol coproduction. **Energy**, v. 139, p. 630-645, 2017.

LIU, P. R.; RAFTERY, A. E. Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 C target. **Communications 48ppli & environment**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2021.

LUNDMARK, R.; ATHANASSIADIS, D.; WETTERLUND, E. Supply assessment of forest biomass—a bottoms-up approach for Sweden. **Biomass and bioenergy**, v. 75, p. 213-226, 2015.

MABEE, W. E.; MIRCK, J.; CHANDRA, R. Energy from forest biomass in Ontario: Getting beyond the promise. **The forestry 48pplied48l**, v. 87, n. 1, p. 61-70, 2011.

MARKOWSKI-LINDSAY, M. *et al.* Forest-based biomass supply in Massachusetts: How 48pppl is there and how 48pppl is available. **Journal of environmental management**, v. 106, p. 1-7, 2012.

MARTINS, F. *et al.* Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries. **Energies**, v. 12, n. 6, p. 964, 2019.

MATUŠTÍK, J.; KOČÍ, V. Does renewable mean good for climate? Biogenic carbon in climate impact assessments of biomass utilization. **GCB Bioenergy**, v. 14, n. 4, p. 438-446, 2022.

MERCANTE, A. L. P. Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar. 2021.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 2ª ed. Há. Atual. – Brasília, DF: Embrapa informações tecnológicas, 2010

MOBINI, M.; SOWLATI, T.; SOKHANSANJ, S. Forest biomass supply logistics for a power plant using the discrete-event simulation approach. **Applied energy**, v. 88, n. 4, p. 1241-1250, 2011.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL, K. Forest biomass supply chains in Ireland: A life cycle assessment of GHG emissions and primary energy balances. **Applied Energy**, v. 116, p. 1-8, 2014.

MYLLYVIITA, T. *et al.* Sustainability assessment of wood-based bioenergy—A methodological framework and a case-study. **Biomass and bioenergy**, v. 59, p. 293-299, 2013.

NICHOLLS, D.; MONSERUD, R.; DYKSTRA, D. **Synthesis of Biomass Utilization for Bioenergy Production in the Western United States**. DIANE Publishing, 2008.

PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.

PARÉ, D. *et al.* The potential of forest biomass as há energy supply for canada. **The Forestry Chronicle**, v. 87, n. 1, p. 71-76, 2011.

PARI, L. *et al.* Preliminary evaluation of a short rotation forestry poplar biomass supply chain in Emilia Romagna Region. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 44, n. s2, 2013.

PAULO, H. *et al.* Supply chain optimization of residual forestry biomass for bioenergy production: the case study of Portugal. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 245-256, 2015.

PENA-VERGARA, G. *et al.* Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, v. 239, p. 122243, 2022.

PÉREZ-VICENTE, S.; RUIZ, M. Expósito. Descriptive statistics. **Allergologia et immunopathologia**, v. 37, n. 6, p. 314-320, 2009.

PETERS, G. P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 245-250, 2010.

PEURA, P.; HYTTINEN, T. The potential and economics of bioenergy in Finland. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9-10, p. 927-945, 2011.

PYÖRÄLÄ, P.; KELLOMÄKI, S.; PELTOLA, H. Effects of management on biomass production in Norway spruce stands and 50plied balance of bioenergy use. **Forest Ecology and Management**, v. 275, p. 87-97, 2012.

RAFAEL, S. *et al.* Atmospheric emissions from forest biomass residues to energy supply chain: A case study in Portugal. **Environmental engineering 50plied**, v. 32, n. 6, p. 505-515, 2015.

RAFAEL, S. *et al.* 50plied50l forest biomass residues to the energy supply chain on regional air quality. **Science of The Total Environment**, v. 505, p. 640-648, 2015.

RAZM, S. *et al.* A global bioenergy supply network redesign through integrating transfer pricing under uncertain condition. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 1081-1095, 2019.

REN, H.; ZHOU, W.; QIAN, X. Realizing a Local Low-Carbon Society Through Urban-Rural Linkage. In: **East Asian Low-Carbon Community**. Springer, Singapore, 2021. p. 105-118.

REN21. **Annual Report 2019**. AIMS Mathematics. V.5, n. 1, p. i-v, 2020.

REPO, A. *et al.* Sustainability of forest bioenergy in Europe: land-use-related 50plied dioxide emissions of forest 50plied residues. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 4, p. 877-887, 2015.

ROBINSON, J, K.; CALLEN, J, P. The best of the best: a new section led by Henry W. Lim, MD. **Archives of Dermatology**, v. 146, n. 5, p. 554-554, 2010.

SCHMIDT, J. *et al.* Cost-effective policy instruments for greenhouse gas emission reduction and 50plie fuel substitution through bioenergy production in Austria. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3261-3280, 2011.

SEDJO, R. A. The economics of forest-based biomass supply. **Energy Policy**, v. 25, n. 6, p. 559-566, 1997.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Boletim SNIF 2017: Sistema Nacional de Informações Florestais**. Brasília, DF, 2017.

SGARBOSSA, A. *et al.* Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Supply Chains. **Forests**, v. 11, n. 11, p. 1127, 2020.

SHABANI, N.; SOWLATI, T.; OUHIMMOU, M. Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty. **Energy**, v. 78, p. 346-355, 2014.

SHABANI, N.; SOWLATI, T.; A hybrid multi-stage stochastic programming-robust optimization model for maximizing the supply chain of a forest-based biomass power plant considering uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3285-3293, 2016.

SHU, Q. *et al.* Optimization of Samples for Remote Sensing Estimation of Forest Aboveground Biomass at the Regional Scale. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4187, 2022.

SOSA, A. *et al.* Managing the moisture applied of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. **Energy**, v. 86, p. 354-368, 2015.

STASKO, T. H. *et al.* Mapping woody-biomass supply costs using forest inventory and competing industry data. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 263-271, 2011.

STRANDGARD, M. *et al.* Potential application of overseas forest biomass supply chain experience to reduce costs in emerging Australian forest biomass supply chains—a literature review. **Australian Forestry**, v. 82, n. 1, p. 9-17, 2019.

SVAZAS, M. *et al.* Sustainable supply chain of the biomass cluster as a 51ppli for preservation and enhancement of forests. **Journal of International Studies**, v. 12, n. 2, 2019.

TATSUHARA, S. Estimating Potential Woody Biomass Supply under Sustainable Timber Production from Plantation Forests in a Snowy Mountainous Region of Japan. **South-east European forestry: SEEFOR**, v. 11, n. 1, p. 29-39, 2020.

TEIXEIRA, T. R. *et al.* Forest biomass power plant installation scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 35-47, 2018.

THAKUR, A.; CANTER, C. E.; KUMAR, A. Life-cycle energy and emission analysis of power 51pplied51151 from forest biomass. **Applied energy**, v. 128, p. 246-253, 2014

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, set. 2003.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report**. 2022. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2023.

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Independent statistics e analisys. Biomass explained: wood and wood waste**. 2022. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/wood-and-wood-waste.php>. Acesso em: 29 out. 2022.

VALENTE, C.; HILLRING, B. G.; SOLBERG, B. Bioenergy from mountain forest: a life cycle assessment of the Norwegian woody biomass supply chain. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 26, n. 5, p. 429-436, 2011.

VERKERK, P. J. *et al.* The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union. **Forest ecology and management**, v. 261, n. 11, p. 2007-2015, 2011.

VIANA, H. *et al.* Assessment of forest biomass for use as energy. GIS-based analysis of geographical availability and locations of wood-fired power plants in Portugal. **Applied Energy**, v. 87, n. 8, p. 2551-2560, 2010.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the 52pplie classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, maio 2016.

WHITE, M. D.; MARSH, E. E. Content analysis: A flexible methodology. *LibraryTrends*, v. 55, n. 1, p. 22 45, 2006.

WHITE, E. M. **Woody biomass for bioenergy and biofuels in the United States: A briefing paper**. DIANE Publishing, 2010.

WOO, H. *et al.* Assessment techniques in forest biomass along the timber supply chain. **Forests**, v. 10, n. 11, p. 1018, 2019.

YAGI, K.; NAKATA, T. Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technical characteristics. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2883-2892, 2011.

YEMSHANOV, D. *et al.* Cost estimates of post 52pplied forest biomass supply for Canada. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 80-94, 2014.

YOSHIOKA, T.; SAKAI, H. Amount and availability of forest biomass as há energy resource in a mountainous region in Japan: a GIS-based analysis. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 26, n. 2, p. 59-70, 2005.

ZHANG, L. *et al.* Bioenergy power 52pplied52l52 in Inner Mongolia, China: supply logistics and feedstock cost. **International Forestry Review**, v. 12, n. 4, p. 396-406, 2010.

ZHANG, Y.; ZUO, Y.; BAI Y. Potential use and development strategy of bioenergy in southeast China-the case of Jiangsu Province. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 17, n. 8^a, p. 1088-1095, 2008.

ZHANG, L.; ZHANG, C.; ZANG, L. Case Studies on Biofuel Supply Logistics for Forest Bioenergy in China. In: **LISS 2013**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. P. 1221-1225. 2013.

ZHANG, M. *et al.* Trade-offs between economic and environmental optimization of the forest biomass 52pplied52l52 supply chain in inner Mongolia, China. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 2030, 2017.

3 ARTIGO 2 – ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA FLORESTAL PARA BIOENERGIA NO BIOMA AMAZÔNIA

RESUMO

Quantificar e promover a espacialização da biomassa florestal é de extrema importância para uma melhor gestão e controle deste recurso. Nesse sentido, este estudo analisou a disponibilidade de biomassa florestal para bioenergia no bioma Amazônia. Foi estimado a biomassa acima do solo, a madeira comercial – sob manejo florestal sustentável – e os resíduos resultantes da fase de rendimento da madeira. Considerou-se esses resíduos para serem empregados no processo de geração de energia – bioenergia. A metodologia foi desenvolvida em ambiente SIG, no aplicativo ARCGIS, versão 10.5. Para calcular a biomassa acima do solo, utilizou-se a Cokrigagem, empregando como variável principal, parcelas amostrais previamente calculadas e como secundárias, a precipitação anual e a vegetação por classe de fitofisionomia, abrangendo apenas a fitofisionomia Ombrófila. Como resultado da Cokrigagem, gerou-se um arquivo raster com informações de biomassa para o bioma Amazônia. Roraima ($397,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) e Amapá ($348,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) obtiveram os maiores valores, reforçando o bom estado de conservação de suas florestas. Os estados com as maiores áreas, Amazonas e Pará, obtiveram os maiores potenciais de energia, sob manejo sustentável foram 13.023 MW/ano e 9.166 MW/ano , respectivamente, e sob o potencial total: 223.772 MW/ano e 157.498 MW/ano . A importância desse estudo se deu ao incentivar a diversificação da matriz elétrica da Amazônia. Possibilitou ainda, especular uma melhor gestão, da biomassa sob manejo florestal sustentável e da biomassa total, bem como, o potencial de geração de energia, evidenciando os estados mais atrativos para o maior uso da bioenergia.

Palavras-chave: Biomassa florestal. Amazônia. Geoprocessamento.

PAPER 2 – ANALYSIS OF FOREST BIOMASS AVAILABILITY FOR BIOENERGY IN THE AMAZON BIOME

ABSTRACT

Quantifying and promoting the spatial distribution of forest biomass is extremely important for better management and control of this resource. In this sense, this study analyzed the availability of forest biomass for bioenergy in the Amazon biome. Aboveground biomass, commercial wood – under sustainable forest management – and residues resulting from the wood yield phase were estimated. These residues were considered to be used in the energy generation process – bioenergy. The methodology was developed in a GIS environment, in the ARCGIS application, version 10.5. To calculate the aboveground biomass, Cokriging was used, using previously calculated sample plots as the main variable and, as secondary variables, annual precipitation and vegetation by phytophysiology class, covering only the Ombrophylous phytophysiology. As a result of Cokriging, a raster file was generated with biomass information for the Amazon biome. Roraima (397.2 Mg ha⁻¹) and Amapá (348.3 Mg ha⁻¹) obtained the highest values, reinforcing the good state of conservation of their forests. The states with the largest areas, Amazonas and Pará, had the highest energy potential, under sustainable management they were 13,023 MW/year and 9,166 MW/year, respectively, and under full potential: 223,772 MW/year and 157,498 MW/year. The importance of this study was due to encouraging the diversification of the electric matrix in the Amazon. It also made it possible to speculate on better management of biomass under sustainable forest management and total biomass, as well as the potential for energy generation, highlighting the most attractive states for greater use of bioenergy.

Keywords: Forest biomass. Bioenergy. Amazon. Geoprocessing.

3.1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas florestais cobrem cerca de 30% da superfície terrestre e armazenam aproximadamente 85% do carbono orgânico disponível no meio ambiente (BRIENEM, 2015). Devido à importância das florestas no ciclo do carbono global, tem sido crescente o interesse de muitos pesquisadores sobre o fluxo e o estoque de carbono nos ecossistemas naturais (RATUCHNE et al., 2016). As questões climáticas ligadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), têm aumentado esse interesse uma vez que as florestas exercem um papel essencial na remoção do carbono atmosférico (FERREIRA et al., 2016).

A biomassa vegetal varia espacial e temporalmente, dependendo dos tipos de ecossistemas (HOUGHTON et al., 2009). Além disso, um problema comum em florestas como as do bioma Amazônia é a perda de biomassa causada pela exploração predatória de seus recursos, especialmente os madeireiros (VERÍSSIMO; LIMA; LENTINI, 2002). Por isso, o processo de quantificação e espacialização é de grande importância uma vez que traz informações sobre a magnitude, a localização, o comportamento das fontes e sumidouros terrestres de carbono (RAMIREZ, 2015).

A Amazônia é a maior floresta em extensão e biodiversidade do Brasil, abrangendo 49% do território (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SFB, 2019). Evidenciando o seu enorme potencial, estima-se que essa região detenha um estoque de madeira de 60 bilhões de m³ e que nela cresçam um terço de toda a madeira tropical do mundo (BARROS; VERÍSSIMO, 2002; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2008). No entanto, estimar este recurso é extrema dificuldade devido a sua extensão, além disso, essa região apresenta inúmeras localidades isoladas cujo acesso pode ser dificultoso.

Biomassa é a quantidade expressa em massa do recurso vegetal disponível em uma área (MARTINELLI, 1994). A quantificação da biomassa florestal acima do solo, constituída por árvores e arbustos, pode ser obtida por meio de métodos diretos e indiretos (BROWN; GILLESPIE; LUGO, 1989). O primeiro, consiste na derrubada de árvores e arbustos e pesagem de seus componentes. Brown; Gillespie e Lugo (1989) mencionaram que essas estimativas podem gerar resultados insatisfatórios devido a obtenção de dados de poucas e pequenas parcelas.

Os métodos indiretos são baseados em informações de inventários florestais – avaliação/catalogação precisa dos recursos florestais disponíveis em uma dada área (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2023). A estimativa de biomassa é calculada por meio de equações alométricas que consideram dados como altura e diâmetro das árvores (WOORTMANN, 2010). Segundo Chave et al. (2005), esses métodos são mais consistentes e seguros, pois os inventários florestais possuem maior precisão do volume gerado e das características da vegetação de uma região.

Recentemente, tem-se somado tais alternativas ao sensoriamento remoto para a quantificação da biomassa florestal. Esse método representa, atualmente, o caminho mais econômico e operacional quando se estuda áreas extensas (RAMIREZ, 2015). O mapeamento da biomassa na Amazônia ainda é um processo desafiante, principalmente em função da ocorrência de saturação dos índices de vegetação em áreas de florestas densas, e devido à alta frequência de nuvens minimizando a disponibilidade de imagens úteis de satélite (RAMIREZ, 2015). Desse modo, emprega-se o sensoriamento remoto em conjunto com dados de biomassa estimados em campo. O uso de dados mensurados em campo é essencial para a calibração e validação da informação gerada a partir do sensoriamento (FRENCH et al., 2013; MITCHARD et al., 2014).

Utilizando o sensoriamento remoto e amostragens em campo, Ferreira (2019) encontrou valores entre 286 a 340 Mg ha⁻¹ para biomassa total acima do solo em regiões sob manejo sustentável da Amazônia brasileira. Ramirez (2015) encontrou de 96 a 258 Mg ha⁻¹. Souza (2020), seguindo uma metodologia parecida. Para Marcos e Kirchner (2008), o volume variou entre 272,38 a 402,92 Mg ha⁻¹.

A exploração florestal para a produção de madeira deve ser derivada de locais sob regime de manejo florestal sustentável – MFS – (SFB, 2019). O MFS consiste no emprego de técnicas ambientalmente adequadas visando promover benefícios sociais, ambientais e econômicos para a produção contínua de produtos florestais (BRASIL, 2009). A madeira, deixa a floresta em forma de toras e posteriormente passa pelo processo de serragem nas indústrias, que é a produção de tábuas espessas que servirão de matéria prima. A quantificação da serragem é definida como rendimento que é a relação entre o volume serrado e o volume da tora, em porcentagem (STEELE, 1984).

O processo de rendimento na Amazônia é considerado baixo devido à falta de investimentos em equipamentos, capacitação e em matérias-primas de qualidade (RUIVO; JARDIM, 2007). É gerado, portanto, uma grande quantidade de resíduos como pó e

serragens. Feitosa (2008), entre outros autores, destacam que apenas cerca de 35% de cada tora é transformado em produto serrado, o restante é desperdiçado. Nesse sentido, uma opção interessante seria destinar esses resíduos para a bioenergia – energia proveniente da transformação de recursos orgânicos em energia elétrica e/ou térmica, através de diferentes processos (MERCANTE, 2021).

Sob a hipótese que por meio da estimativa da biomassa total acima do solo, é possível alcançar o percentual de árvores comerciais através de valores de equivalência disponíveis na literatura. E a partir desses dados, calcular o volume de resíduos que uma determinada quantidade de madeira pode gerar, e transformar os resíduos em potencial energético para verificar se o emprego da bioenergia é uma opção viável. Este estudo analisou a disponibilidade de biomassa florestal acima do solo e a sua viabilidade para bioenergia no bioma Amazônia.

3.2 MATERIAL E MÉTODO

- **Área de estudo**

A floresta amazônica representa 67% das florestas tropicais do mundo, possui uma área de aproximadamente 4,2 milhões de km², cobrindo 49,29% do território brasileiro (SFB, 2019; SILVA et al., 2021). Compreende por completo seis estados, sendo eles: Amazonas, Pará, Amapá, Roraima, Rondônia, Acre e partes do Tocantins, Maranhão e Mato Grosso (CAZZOLATO, 2020; DA SILVA et al., 2021).

A Amazônia está situada na faixa equatorial do planeta cujo o clima recebe influência das massas de ar quentes e úmidas, por isso, a vegetação é dependente das chuvas (ALVARES, 2013). Caracteriza-se por sua enorme biodiversidade e por comportar inúmeros ecossistemas, como florestas densas de terra firme, florestas estacionais, florestas de igapó, campos alagados e savanas (MOTA, 2020; PERIGOLO, 2017).

A metodologia do presente estudo foi desenvolvida em ambiente SIG, no software Arcgis versão 10.5. Dividiu-se em duas etapas, primeiramente montou-se um banco de dados para as análises de quantificação de biomassa acima do solo no bioma Amazônia. Posteriormente, calculou-se a biomassa total acima do solo, a madeira comercial gerada e o resíduo do processamento que seria produzido. Por fim, calculou-se o potencial de energia elétrica que poderia ser originado considerando os resíduos sob manejo sustentável e abrangendo o potencial total.

- **Montagem do banco de dados para a quantificação de biomassa acima do solo no bioma Amazônia.**

Em síntese, foram obtidos vetores de rodovias, uso e cobertura da terra e fitofisionomias florestais (IBGE, 2017; IBGE, 2019). Os rasters utilizados consistiram nos dados de precipitação produzido pelo NASA-TRMM (2017). A finalidade do banco de dados foi estimar a biomassa florestal total acima do solo com base em 420 pontos amostrais calculados e fornecidos por Mitchard et al. (2014), Sullivan et al. (2017), Schepaschenko et al. (2019), expostos na Figura 3.1. Os dados disponibilizados já vieram previamente calculados em Mg ha^{-1} , conforme a metodologia empregada pelos autores, e cada ponto amostral continha informações para 1 hectare (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Vetores utilizados para montagem do banco de dados visando a espacialização da biomassa acima do solo no bioma Amazônia

Vetores	Fonte
Uso e cobertura da terra	MapBiomass (2017)
Rodovias	IBGE (2019)
Precipitação	NASA-TRMM (2017)
Pontos de biomassa acima do solo	Mitchard et al. (2014), Sullivan et al. (2017), Schepaschenko et al. (2019).
Fitofisionomias florestais	IBGE (2017).
Limites Estaduais	IBGE (2019).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Utilizou-se o vetor de mudança do uso e cobertura da terra para o ano de 2017 da coleção 3.0 com resolução espacial de 30 metros. As informações referentes a precipitação foram derivadas do projeto *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2* (MERRA-2) disponibilizado pela NASA. Esse projeto caracteriza-se por ser uma reanálise atmosférica referente a era moderna de satélites, gerando imagens desde 1980 até atualmente. A resolução da reanálise é de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ em latitude e longitude, respectivamente, e foi obtida em mm/mês. Dessa forma, foram utilizadas imagens mensais para compor uma única imagem anual.

Delimitou-se as fitofisionomias florestais a partir do mapa de vegetação fornecido

pelo IBGE, em uma escala de 1:250.000 contida na versão 2017. Esse mapa foi baseado em imagens do sensor do satélite LM Landsat e a definição das fitofisionomias segue o Manual técnico da vegetação brasileira (IBGE, 2012) e Veloso; Rangel-Filho e Lima, (1991).

Retirou-se as áreas antropizadas como influencia urbana, pastagens, áreas agrícolas e vegetação secundária com o intuito de evidenciar apenas as áreas de vegetação original. O mapa de tipologias florestais serviu de base para a espacialização da biomassa por fitofisionomias (variável auxiliar). Na Figura 3.1, vê-se a distribuição do bioma Amazônia em território brasileiro – área de estudo – e os pontos de amostragem de biomassa acima do solo mencionados anteriormente.

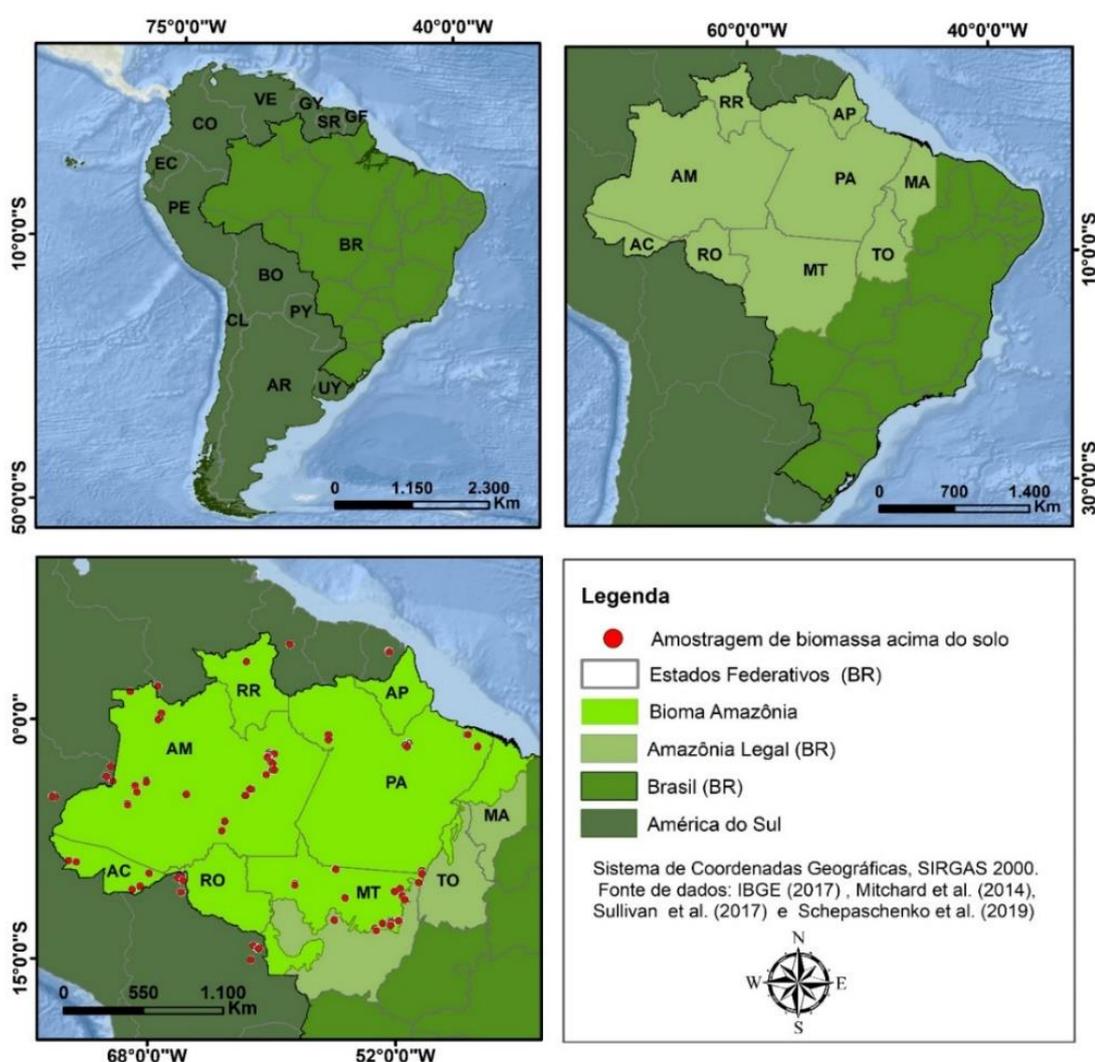


Figura 3.1. Distribuição do bioma Amazônia em território brasileiro e amostras de biomassa acima do solo disponibilizadas por Mitchard et al. (2014); Sullivan et al. (2017) e Schepaschenko et al. (2019).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Todas as imagens que compõe o banco de dados foram configuradas para o sistema de projeção Cônica Equivalente de Albers, com a finalidade de preservar as áreas e diminuir as distorções. Em seguida, as imagens foram padronizadas e reamostradas para resolução espacial de 1 km x 1 km.

- **Distribuição da biomassa acima do solo**

Para espacializar a biomassa acima do solo, analisou-se quatro técnicas, foram elas a krigagem ordinária (krig ord), a cokrigagem, com a variável auxiliar sendo a vegetação por fitofisionomia (cokrig-veg), a cokrigagem, utilizando como variável auxiliar o mapa de vegetação por classe de fitofisionomia florestal e a precipitação média anual (cokrig-veg-prec), por fim, analisou-se a cokrigagem tendo como variável auxiliar a precipitação média anual (cokrig-prec).

De acordo com Barni et al. (2016), a krigagem trabalha com a estimativa de valores de uma variável espacial em locais ainda não amostrados. Isso é possível por meio da interpolação a partir das médias móveis de pontos amostrais. Presume-se que os valores da variável espacial sejam conhecidos ao longo do local não amostrado. Para a realização desta técnica, é necessário primeiramente, modelar o semivariograma cuja a sua modelagem associa a variabilidade da estimativa entre dois pontos amostrais baseados na distância que os separam. A influência será maior ou menor de acordo com a distância entre os pontos.

Segundo Landim; Sturaro e Monteiro (2002), a geoestatística emprega em suas análises duas técnicas básicas, são elas: krigagem, onde a variável resposta depende apenas dela mesma e da distância entre as suas medições. E a cokrigagem que além da variável resposta (variável primária) utiliza outra variável explicativa (variável secundária, de fácil medição e fortemente correlacionada com a primária) além de utilizar a distância entre suas medições.

O banco de dados montado para a espacialização da biomassa acima do solo foi aleatoriamente subdividido em duas subamostras: um conjunto com 10% das amostras e outro conjunto com 90% das amostras. O primeiro conjunto correspondente a 10% dos dados foi utilizado para a validação e determinação do melhor modelo de interpolação após a obtenção dos mapas de BAS conforme a metodologia de Barni et al. (2016). Para as técnicas de espacialização, empregou-se a ferramenta *Geostatistical Analyst*.

Analisou-se os interpoladores por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) proposto por Hengl (2009) (Equação 3.1), Erro Quadrático Médio (EQM) sugerido por Phillips; Dolph; Marks (1992) (Equação 3.2), percentual de eficiência (EF%) levantado por Greenwood; Neeteson; Draycott (1985) (Equação 3.3), coeficiente de determinação ajustado (R2) (Equação 3.4), coeficiente de correlação (r) (Equação 3.5), índice de concordância proposto por Willmott (1981) (Equação 3.6) e índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas, (1996) (Equação 3.7) (BARNI et al., 2016).

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_{obs}(X_i) - Z_{est}(X_i)]^2 \right\}^{0,5} \quad (3.1)$$

Onde:

n : número de valores utilizados na validação;

$Z_{obs}X_i$: o valor estimado da propriedade no i -ésimo ponto; e

$Z_{est}X_i$: valor observado da propriedade no i -ésimo ponto

É presumido que quanto maior for o valor do RMSE, maior é a superestimação dos valores de biomassa pelo modelo em avaliação.

$$EQM = \frac{\sum_1^n (Ei - Oi)}{n} \quad (3.2)$$

Onde:

EQM : erro quadrático médio;

Oi : valores observados nos pontos do conjunto de teste;

Ei : valores estimados pelos interpoladores em cada ponto; e

n : número de observações (correspondente ao conjunto com 10% das amostras).

Neste caso, também se pressupõe que quanto maior o valor do EQM, maior é a superestimação dos valores de biomassa.

$$\%EF = 100x \left(\frac{\sum_i^n (Ei - Oi)^2}{\sum_i^n (Ei - \hat{O})^2} \right) \quad (3.3)$$

Onde:

$EF\%$: percentual de eficiência;

E_i : valores estimados pelos interpoladores;

O_i : valores observados nos pontos do conjunto de teste; e

\hat{O} : média dos valores observados na amostra reservada.

Presume-se que quanto maior o valor encontrado de %EF, menor é a eficiência do modelo em estimar a biomassa.

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - (p + 1)} \right) (1 - R_p^2) \quad (3.4)$$

R_a^2 coeficiente de determinação ajustado;

n : tamanho da amostra;

p : número de variáveis independentes; e

R_p^2 : coeficiente múltiplo de determinação

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.5)$$

r : coeficiente de correlação de Pearson e

x e y : valores da série observada e da série linear gerada, respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(E_i - O_i) + (O_i - \bar{O})]^2} \quad (3.6)$$

d : índice de concordância ou ajuste;

O_i : valores observados nos pontos do conjunto de teste;

E_i : valores estimados pelos interpoladores em cada ponto; e

\bar{O} : média dos valores observados na amostra reservada.

Por meio do teste, presumiu-se que os valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita).

$$c = r \times d$$

(3.7)

Onde:

Em que,

c: índice de confiança ou desempenho (c);

r: coeficiente de correlação; e

d: índice de concordância

O teste indica que os valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita).

Os parâmetros foram calculados a partir da subamostra de pontos e comparados com os valores estimados pelos quatro métodos nas mesmas Coordenadas. Utilizou-se também um teste de médias (Teste-t) entre os valores previstos pelos quatro modelos e os valores da amostra a fim de comparar e verificar se os resultados diferem ou não da média da amostral (BARNI et al.,2016). Para isso, foi empregado o *software R Core Team* (2018), versão 1.1.456.127. Para a espacialização da biomassa acima do solo, utilizou-se o melhor modelo entre as quatro técnicas de krigagem utilizada. Desse modo, obteve-se o conteúdo de biomassa por classe de fitofisionomia.

- **Estimativa da biomassa acima do solo para o Bioma Amazônia**

Como resultado da cokrigagem gerou-se um arquivo raster correspondente ao bioma Amazônia. Cada pixel continha informações de biomassa florestal para uma área de 100 ha. Como o processamento para a estimativa de biomassa florestal é oneroso, calculou-se o potencial separadamente, por estado. Primeiramente, recortou-se a imagem raster considerando os estados, empregando-se a ferramenta *Extract by Mask*. Posteriormente, foi recortado o limite estadual considerando as fitofisionomias florestais, utilizando-se a ferramenta *Clip*. Neste estudo, utilizou-se as fitofisionomias florestais do grupo *Ombrófila*, divididas em *densa* e *aberta*, totalizando sete subtipos. A Distribuição da vegetação Ombrófila, densa e aberta, no bioma Amazônia está disposta na Figura 3.2, abaixo.

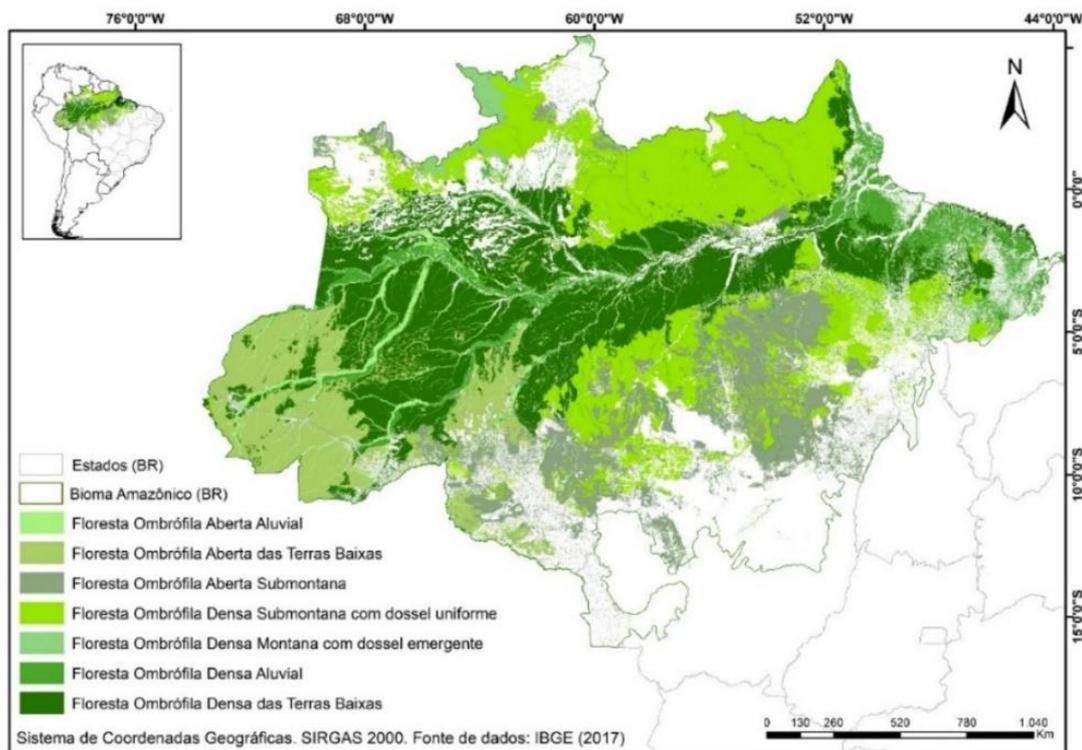


Figura 3.2. Distribuição das florestas ombrófilas densas e abertas no bioma Amazônia

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Relacionou-se os arquivos contendo as fitofisionomias florestais com a imagem raster e foi solicitado a soma dos pixels em cada estado. A soma dos pixels correspondia ao total de biomassa por estado. Para encontrar a biomassa pela área, dividiu-se o valor encontrado pela área, em hectares. Utilizou-se a ferramenta *Zonal Statistics*. Desse modo, obteve-se o volume total de biomassa acima do solo disponível em cada estado, em Mg ha¹.

Para uma melhor visualização dos resultados, os estados foram divididos em Amazônia ocidental e oriental. A porção ocidental é constituída pelos estados: Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima, já a parte oriental é formada pelo: Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021).

- **Estimativa de madeira comercial e potencial energético**

Para encontrar o volume de madeira comercial a partir da biomassa total acima do solo, utilizou-se os dados obtidos na pesquisa de Romero et al. (2021). O estudo foi realizado em uma área de 1.253 ha situada no município de Porto Acre, Acre, no sudoeste da Amazônia brasileira. Os autores verificaram que na área de estudo, o fuste comercial –

representado pela tora apta aos processos industriais – apresentou um volume de 19,25 m³ ha⁻¹ sob um ciclo de corte de 35 anos, a quantidade de biomassa total acima do solo estimada foi de 330,5 Mg ha⁻¹. Presumindo-se que 330,5 m³ ha corresponda ao volume total no local de estudo, pôde-se inferir que o fuste comercial representou 5,82% (19,25 m³ ha⁻¹). Desse modo, considerou-se que 5,82% da biomassa total acima do solo aqui encontrada, abrangendo cada fitofisionomia, corresponderia a porção de madeira comercial.

Sabendo-se que o fuste é a parte da madeira que se emprega na comercialização, pôde-se calcular a geração de energia a partir dos resíduos gerados no beneficiamento. Para o cálculo, utilizou-se a Equação 3.8 que evidencia o potencial de energia gerado por uma termelétrica de base florestal que leva em conta um sistema convencional de turbina a vapor (ciclo Rankine) com rendimento de 30% (médio porte). Os dados utilizados para conversão foram retirados do Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO (2009).

$$\text{Potencial (MW/ano)} = \frac{[(mg * 0.5) * 2000 \text{ kcal kg}^{-1} * 0.30]}{(860 * 8.322)} \quad (3.8)$$

Na geração de resíduos da biomassa, computou-se apenas o resultante de seu processamento, isto é, 50% do volume total (Mg) da madeira em tora (CENBIO, 2009). O Poder Calorífico Inferior (PCI) utilizado foi de 2.000 kcal kg⁻¹, o rendimento da turbina a vapor foi de 30% (médio porte) e o fator de conversão de kcal/kg para kWh kg⁻¹ foi realizada pela divisão por 860 (COELHO; PALETTA; FREITAS, 2000). Considerou-se que o sistema opere o ano todo com os resíduos gerados e que a operação ocorra em 95% das horas anuais, o que resulta em 8.322 horas de operação/ano.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O bioma Amazônia produz o maior volume de madeira comercial legal no Brasil. No ano de 2017, o Pará (3,2 milhões de m³) e o Mato Grosso (3,9 milhões de m³) responderam por 63% da madeira em tora produzida, considerando as florestas públicas passíveis de concessão. Estes estados foram seguidos por Rondônia (1,3 milhões de m³), Amazonas (875 mil m³), Amapá (804 mil m³), Roraima (796 mil m³), Acre (213 mil m³), Maranhão (86 mil m³) e Tocantins (62 mil m³) (SFB, 2020).

Ressalta-se que grande parte da madeira em tora apta a comercialização passa pelo

processo de beneficiamento. Nesta etapa, uma grande quantidade de resíduos como serragens e pós são gerados e em muitos casos, são depositados em áreas impróprias devido à falta de utilidade. No entanto, em muitos países este recurso é visto com bom potencial para ser empregado na bioenergia e assim, proporcionar uma matriz energética mais diversificada e segura. Neste contexto, considerando o grande estoque de biomassa florestal presente na Amazônia, foi proposto uma análise do potencial da bioenergia nesta região.

- **Análise dos modelos de krigagem para a obtenção do volume de biomassa total acima do solo**

Por meio das análises, constatou-se que o modelo que apresentou os melhores resultados foi o da Cokrigagem com as variáveis de vegetação classificada por fitofisionomia e precipitação. Neste modelo, os valores de REQM, EQM, %EF foram menores, enquanto que para os coeficientes R_a^2 , r, e c foram maiores, exceto o coeficiente d onde não foi observado um valor superior. Observou-se que os valores médios estimados não foram diferentes da média dos pontos extraídos através do banco de dados, apresentando 95% de confiança (Teste t). Utilizou-se para a precipitação a média anual entre 2002 e 2015 e para vegetação, empregou-se o mapa fornecido pelo IBGE com dados para 2017. Na Tabela 3.2, observa-se a distribuição dos valores encontrados na realização dos testes de krigagem para a verificação do melhor modelo de interpolação.

Tabela 3.2. Distribuição dos dados referentes a validação cruzada (acuracidade) e estudo do melhor modelo de interpolação para estimativa da média da biomassa florestal acima do solo (Mg ha⁻¹) no bioma Amazônia. Foi analisado a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), EQM = Erro Quadrado Médio, %EF = Percentual de Eficiência, R^2_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado, r = Coeficiente de correlação, d = Índice de concordância e c = Índice de confiança.

Interpoladores	REQM	EQM	%EF	R^2_{aj}	r	d	c	p-valor regressão	p-valor teste t	Biomassa Media
Subamostras										294,68
Krig Ord	45,96	2112,28	53,14	0,47	0,69	0,62	0,43	<0,0001	0,70	292,74
Cokrig-Veg	46,68	2178,57	54,80	0,51	0,71	0,55	0,38	<0,0001	0,77	293,36
Cokrig-Veg-Prec	45,05	2029,81	51,06	0,55	0,74 0	0,59	0,47	<0,0001	0,35	290,24

Cokrig- Prec	45,05	2384,22	59,98	0,47	0,68	0,49	0,39	<0,0001	0,71	292,99
---------------------	-------	---------	-------	------	------	------	------	---------	------	--------

Considera-se que: Krig Ord= Krigagem Ordinária, Cokrig-Veg= CoKrigagem com Vegetação, Cokrig-Veg-Prec= CoKrigagem com Vegetação e Precipitação, Cokrig-Veg-Prec-Temp= CoKrigagem com Vegetação, Precipitação e Temperatura, Cokrig-Prec= CoKrigagem com Precipitação. Para a Krig-Ord, modelou-se o semivariograma a partir de uma única variável de pontos amostrais (biomassa total) como entrada.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A partir da cokrigagem, obteve-se um mapa de superfície de biomassa (Mg ha^{-1}) contínua dos valores estimados a partir dos dados amostrais. Este mapa, foi transformado para o formato raster com 1 km^2 de resolução. De acordo com Barni et al. (2016), na execução da Cokrigagem, as variáveis auxiliares substituem a variável principal na predição em locais não amostrados ou pobremente amostrados por ela. Nesse caso é modelado um semivariograma para a variável principal e outro para cada variável auxiliar.

- **Estimativa da biomassa potencial acima do solo nos estados do bioma Amazônia**

Os dados de volume de biomassa total acima do solo obtidos pelos estados da Amazônia Ocidental estão dispostos na Tabela 3.3 A fitofisionomia Ombrófila Aberta Aluvial não esteve presente apenas no estado de Roraima, já a floresta Ombrófila Densa Montana não foi constatada no Acre e em Rondônia, as demais tipologias foram observadas em todos os estados.

Roraima apresentou a maior média de estoque de biomassa e foi seguida pelos estados do Amazonas (296 Mg ha^{-1}), Rondônia ($228,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) e Acre ($214,2 \text{ Mg ha}^{-1}$). Apenas Roraima apresentou todos os valores superiores a 300 Mg ha^{-1} . A classe que obteve a maior produtividade foi a Ombrófila Densa Montana com $423,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ em uma área de $2.514.500 \text{ ha}$. A menor produtividade, foi derivada da Ombrófila Densa Aberta das Terras Baixas, com $350,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ que abrangeu também, a menor área, isto é, 31.600 ha . A fitofisionomia que apresentou a maior extensão foi a Ombrófila Densa Submontana com $7.859.200 \text{ ha}$.

Roraima apresentou a maior média considerando o bioma como um todo, $397,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, desse modo, presume-se que este local apresenta um bom potencial para a ampliação da bioenergia. A extensão de Roraima é de 224.301 km^2 e observou-se que nesse estado, a vegetação Ombrófila Densa predomina, no entanto, não foi notado uma grande superioridade

em relação a Ombrófila Aberta. A primeira, obteve uma média de 404,1 Mg ha⁻¹, enquanto a segunda, abarcou 383,6 Mg ha⁻¹.

Barni et al. (2016), utilizando uma metodologia parecida, alcançaram uma média de 404,4 Mg ha⁻¹ em Roraima para a fitofisionomia do grupo ombrófila, densa e aberta. Desse modo, percebe-se que a média aqui encontrada se encontra dentro dos valores já estimados por outros autores. Esses dados, também estão correspondendo as estimativas encontradas por Fearnside et al. (2013) para todos os tipos florestais de Roraima que variaram entre 240 a 513 Mg ha⁻¹.

Tabela 3.3. Biomassa total acima do solo (Mg ha⁻¹) nos estados da Amazônia Ocidental, considerando a extensão das fitofisionomias florestais.

Amazônia Ocidental								
Fitofisionomia florestal	Acre		Amazonas		Roraima		Rondônia	
	Área (ha)	Mg ha ⁻¹	Área (ha)	Mg ha ⁻¹	Área (ha)	Mg ha ⁻¹	Área (ha)	Mg ha ⁻¹
Omb. aberta aluvial	1.356.700	215,6	6.379.200	280,4	-	-	495.800	220,8
Omb. aberta das terras baixas	11.617.200	214,8	20.749.900	241	31.600	350,6	3.479.200	225,6
Omb. aberta submontana	423.100	221,3	5.593.000	261,8	1.007.400	416,5	6.968.400	225
Omb. densa aluvial	73.100	212,4	13.080.800	299	1.319.500	404,9	139.300	235,7
Omb. densa submontana	69.900	202,9	19.344.700	309,7	7.859.200	412,9	850.700	227
Omb. densa das terras baixas	1.225.800	218,5	64.790.100	289,8	947.400	375	159.900	238,9
Omb. densa montana	-	-	1.106.400	390,4	2.514.500	423,4	-	-
Total (ha); Média (Mg ha⁻¹)	14.765.800	214,2	131.044.100	296	13.679.600	397,2	12.093.300	228,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Segundo o Manual da Vegetação Brasileira produzido pelo IBGE em 2012, a vegetação Ombrófila Densa Montana localiza-se no alto dos planaltos e das serras situados entre 600 e 2.000 m de altitude. Apresenta vegetação com altura aproximadamente uniforme, sendo composta principalmente por vegetação de alto porte, alguns ultrapassando 50 m na Amazônia. A Floresta Ombrófila Aberta é considerada uma tipologia de transição entre a Floresta Amazônica e as áreas extra-amazônicas (VELOSO et al., 1991). A Floresta Ombrófila Aberta Aluvial se estabelece ao longo dos cursos de água, ocupa as planícies e terraços periodicamente ou permanentemente inundados – denominados matas-de-várzea ou matas-de-igapó, respectivamente. Suas características se parecem com as da Floresta Ombrófila Densa Aluvial, apresentam muitas palmeiras de grande porte e lianas lenhosas. Na floresta Ombrófila Aberta, por ser uma área de transição, observa-se uma menor concentração de árvores, no entanto, ainda são importantes estocadoras de biomassa no Bioma Amazônia.

Na Tabela 3.4, vê-se os resultados referentes à Amazônia Oriental. A floresta Ombrófila Aberta Aluvial não foi observada apenas no estado do Maranhão. A Ombrófila Aberta das Terras Baixas, não foi visualizada nos estados do Mato Grosso, Tocantins e Amapá. A vegetação Ombrófila Densa das Terras Baixas não foi constatada no Mato Grosso e Tocantins, enquanto a Ombrófila Densa Montana não esteve presente em três estados, sendo eles: Maranhão, Mato Grosso e Tocantins. O estado do Amapá obteve a maior média de produtividade e foi seguido pelos estados do Pará (318,7 Mg ha⁻¹), Maranhão (315,5 Mg ha⁻¹), Tocantins (239,8 Mg ha⁻¹) e Mato Grosso (206,9 Mg ha⁻¹).

Assim como Roraima, todos os valores de biomassa estiveram acima de 300 Mg ha⁻¹. A tipologia Ombrófila Densa Montana obteve o maior estoque, 460,2 Mg ha⁻¹, sendo esse, o valor de produtividade mais alto encontrado neste estudo. Essa tipologia estava distribuída em uma área de 38.900 ha, a menor observada para essa região. A vegetação com a maior extensão foi a Ombrófila Densa Submontana com 8.498.000 ha. A floresta Ombrófila Aberta Aluvial obteve a menor estimativa de biomassa, 300,2 Mg ha⁻¹, em uma área de 68.100 ha, a segunda menor observada. A média para o Amapá foi de 348,3 Mg ha⁻¹, assim como Roraima, este estado concentra atrativos valores de biomassa florestal, demonstrando ser uma área onde o aumento da utilização da bioenergia deve ser melhor analisada. O Amapá possui uma área de 142.815 km², sendo coberta, em maior parte, pelo grupo de Florestas Ombrófila Densa com média de 359,3 Mg ha⁻¹, já a Florestas Ombrófila Aberta teve 326,3 Mg ha⁻¹.

Os valores obtidos para o Amapá reforçam o seu bom estado de conservação, em seu território há cerca de 20 Unidades de Conservação (UCs) e 05 Terras Indígenas. Dos 14,3 milhões de hectares que correspondem à área total do estado, 9,3 milhões de hectares são Unidades de Conservação que somados aos 1,1 milhão de hectares de áreas de Terras Indígenas ocupam, aproximadamente, 73% do território, sendo o estado mais protegido do país, outro ponto importante é que o Amapá localiza-se próximo das fronteiras com países vizinhos e distante do arco do desmatamento (SECRETARIA DE MEIO AMBIENTAL DO AMAPÁ – SEMA AP, 2022).

Tabela 3.4. Biomassa total acima do solo (Mg ha^{-1}) nos estados da Amazônia Oriental, considerando a extensão das fitofisionomias florestais.

Amazônia Oriental										
Tipologia florestal	Maranhão		Pará		Mato Grosso		Tocantins		Amapá	
	Área (ha)	Mg ha^{-1}	Área (ha)	Mg ha^{-1}	Área (ha)	Mg ha^{-1}	Área (ha)	Mg ha^{-1}	Área (ha)	Mg ha^{-1}
Omb. aberta aluvial	-	-	500	305,9	31.200	216,2	1.400	244,7	68.100	300,2
Omb. aberta das terras baixas	5.300	321,2	63.300	329,4	-	-	-	-	-	-
Omb. aberta submontana	75.200	321,4	23.286.200	225,9	8.555.900	205,6	33.200	233,4	54.600	352,3
Omb. densa aluvial	4.679.900	310,1	9.482.500	291,8	387.200	193,3	36.300	246,9	1.542.700	307,1
Ombrófila densa submontana	867.200	291,6	39.759.400	322,2	3.732.600	212,5	75.900	234,1	8.498.000	354,3
Omb. densa das terras baixas	668.700	333,3	17.124.300	314,3	-	-	-	-	2.111.800	315,6
Omb. densa montana	-	-	129.000	441,7	-	-	-	-	38.900	460,2
Total (ha); Média (Mg ha^{-1})	6.296.300	315,5	89.845.200	318,7	12.706.900	206,9	146.800	239,8	12.314.100	348,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em 2020 os estados de Roraima e Amapá foram os que menos desmataram na região norte. Em 2021, o Amapá não apresentou aumento na área desmatada, como geralmente espera-se, no entanto, em Roraima verificou-se uma maior área atingida em relação a 2020 (IBGE, 2022; MAPBIOMAS, 2022). Segundo dados do projeto PRODES – faz o monitoramento por satélite do desmatamento por corte raso na Amazônia – o Amapá é o estado que menos desmata na Amazônia desde 1988. De 2019 a 2022, verificou-se uma média de 19,75 km², enquanto Roraima desmatou 360,5 km² (INPE, 2022).

As médias obtidas pelo estado do Acre (211,3 Mg ha⁻¹), Rondônia (233,9 Mg ha⁻¹), Mato Grosso (202,90 Mg ha⁻¹) e Tocantins (240,50 Mg ha⁻¹) apresentaram valores inferiores a 250 Mg ha⁻¹ para a floresta Ombrófila Densa. Tais dados, encontram-se abaixo da média de biomassa por hectare estimada para Floresta Densa na Amazônia que varia de 250 a 350 Mg ha⁻¹ (AVITABILE *et al.*, 2016; BROWN; LUGO, 1992; FEARNSSIDE; LEAL; FERNANDES, 1993; MAIA ARAÚJO; HIGUCHI; DE CARVALHO, 1999; SAATCHI *et al.*, 2011). A baixa média de produção é somada a constante redução de áreas de florestas nesses estados. Segundo dados do projeto PRODES, estes estados estiveram entre os que mais desmataram considerando o período de 2019 a 2022, o Mato Grosso, ficou em terceiro lugar, com uma média de 1.900 km², Rondônia obteve 1.428 km², para o Acre contou-se 781 km². Mesmo o Tocantins não estando completamente dentro do bioma Amazonia, ainda apresentou dados superiores ao Amapá, sendo de 28 km², mas fortemente pressionado pelo arco do desmatamento (INPE, 2022).

O arco do desmatamento consiste em uma curva ocasionada pelo desflorestamento no bioma Amazônia. Esse arco, inicia-se do oeste do Maranhão e sul do Pará em direção a oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre, essa região é responsável pelas maiores taxas de desmatamento na Amazônia e avanço da fronteira agrícola em direção às florestas nativas (FEARNSSIDE 2017; FONSECA *et al.* 2018; SOARES-FILHO *et al.* 2006). As rodovias Belém - Brasília e Cuiabá - Porto Velho iniciaram a expansão desse arco que atualmente corresponde ao território de 256 municípios, concentrando aproximadamente 75% do desmatamento da região (OVIEDO; LIMA; AUGUSTO, 2019). Nessa área, a terra é desmatada para a criação de gado, agricultura, extração de madeira, além disso, houve um aumento intenso na produção de soja para os mercados mundiais (NASA, 2004).

Os estados que compartilham grandes estradas sofrem maior degradação ambiental. Nepstad *et al.* (2001) analisaram que três quartos dos desmatamentos entre 1978 e 1994

ocorreram dentro de uma faixa de 100 km de largura ao longo das rodovias BR-010 (Belém-Brasília), BR-364 (Cuiabá-Porto Velho) e PA-150.

O Pará e o Amazonas são os maiores estados do Brasil em extensão (1.245.870,700 km² e 1.571.000 km², respectivamente) (IBGE, 2022). A vegetação do tipo Ombrófila Densa é predominante nessa região, com uma média de 342,5 Mg ha⁻¹, no Pará e 322,2 Mg ha⁻¹ no Amazonas. O Pará, obteve a terceira maior média de biomassa acima do solo, 318,7 Mg ha⁻¹, enquanto o Amazonas não seguiu o mesmo fluxo, embora seja o maior estado do país, a média de produtividade obtida foi de 296 Mg ha⁻¹, a quinta maior. Os dados encontrados no Amazonas foram inferiores aos estimados por outros autores. Laurance et al. (1999), obtiveram valores entre 231 a 492 Mg ha⁻¹ nessa região, com uma média de 356 Mg ha⁻¹, já Matos e Kirchner (2007) alcançaram dados entre 272,38 a 402,92 Mg ha⁻¹, com uma média de 343 Mg ha⁻¹ (DE ALMEIDA MATOS; KIRCHNER, 2008)

Com base na produtividade por hectare e da área de florestas nos estados é possível discutir o potencial de conversão de biomassa na Amazônia. A grande maioria dos estados amazônicos são contribuintes do arco do desmatamento. Em 2020, segundo dados analisados pelo MapBiomas Alerta, dos 10 municípios que mais desmataram o país neste ano, 9 estão na região amazônica e 6 estão concentrados no Pará. O estudo revelou também um aumento de 3% no total de desmatamento na região norte do país quando comparado ao ano anterior (2019). Em 2020, foram retirados 758.329 ha nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, sendo que o Pará foi o estado com a maior área desmatada, com 366.334 ha, isto é, 23% a mais do que em 2019. O Amazonas veio em seguida, com 127.967 ha, um aumento de 2% em relação a 2019. Na sequência, foi observado Rondônia cuja sua capital esteve entre as cidades que mais desmataram em 2020 (MAPBIOMAS, 2022).

Considerando o bioma Amazônia como um todo, a vegetação Ombrófila Densa Montana apresentou a maior média, sendo de 428,9 Mg ha⁻¹, enquanto a floresta Ombrófila Aberta Aluvial alcançou a menor, 256,5 Mg ha⁻¹. Isso já era esperado uma vez que a vegetação aberta é composta, em grande parte, de cipós e palmeiras, concentrando uma menor densidade de indivíduos arbóreos por unidade de área (MMA, 2006). As fitofisionomias ombrófilas abertas cobrem cerca de 21% no bioma Amazônia, um percentual menor que o da floresta densa (MMA, 2006).

A fitofisionomia que obteve a maior área foi a Ombrófila Aberta Aluvial com 16.765.045 ha, seguida da Ombrófila Densa das Terras Baixas 12.432.571 ha e Ombrófila

Densa Submontana com 9.006.400 ha. É importante ressaltar que estudos que evidenciam o total do volume de biomassa no bioma Amazônia, incluindo as fitofisionomias florestais Ombrófila densa e aberta são de grande relevância uma vez que elas representam cerca de 60% da composição florestal dessa área (MMA, 2006). Além disso, os resultados demonstrados denotam a importância da vegetação Ombrófila como importantes estocadoras de biomassa no maior bioma brasileiro (DE OLIVEIRA PIVA et al., 2021).

- **Potencial energético total e sob manejo florestal sustentável na Amazônia**

O potencial elétrico foi obtido empregando na Equação 3.8 os resíduos da madeira, sendo de 50% o seu volume. Realizou-se dois cálculos, em um, considerou o volume total disponível em cada estado e no outro, o volume sob manejo florestal sustentável. Na fórmula, incluiu-se o poder calorífico, o porte da usina e o tempo de funcionamento por ano. Para o volume total de biomassa, utilizou-se a soma dos pixels de cada região que correspondia a biomassa em Mg e dividiu-se pela área, em hectare. O cálculo da energia gerada com base na madeira sob manejo sustentável foi realizado multiplicando o volume total pelo percentual correspondente ao volume de madeira comercial que seria de 5,82 % segundo o estudo de Romeiro et al. (2021).

Ressalta-se que os resíduos utilizados para a bioenergia seriam exclusivamente derivados de árvores comerciais de áreas sob manejo florestal sustentável. O potencial com base na biomassa total foi mostrado apenas para fim de conhecimento.

Os resultados para geração de energia abrangendo a Amazônia Ocidental estão dispostos na Tabela 3.5. O Amazonas obteve o maior potencial devido, entre outros fatores, ao somatório das áreas da vegetação Ombrófila que foi de 131.044.100 ha. Os maiores potenciais de energia foram observados na Floresta Densa das Terras Baixas e Ombrófila Densa Montana. Essas vegetações poderiam gerar 45.807 MW/ano e 14.617 MW/ano, respectivamente. A primeira, caracterizou-se por possuir o maior potencial observado no bioma, consequência de apresentar a maior área e boa conservação. Sob manejo sustentável o Amazonas geraria, em média, 13.023 MW/ano, já o potencial total foi de 223.772 MW/ano, mais de 15 vezes superior ao potencial sob manejo.

Atualmente, este estado conta com 117 termelétricas em operação, com um potencial total calculado em 1.749 MW (ANEEL, 2023). Todavia, desse total, apenas 4 usinas funcionam com algum tipo de biomassa, gerando 17 MW. O Amazonas poderia ter, sob

manejo florestal sustentável, mais de 700 vezes o potencial atualmente instalado e ainda assim, corresponderia apenas a 6% do total que poderia ser produzido.

Tabela 3.5. Geração de energia a partir dos resíduos de processamento da madeira na Amazônia Ocidental, considerando o potencial total e sob manejo florestal sustentável.

Amazônia Ocidental								
Fitofisionomia florestal	Acre		Amazonas		Roraima		Rondônia	
	Potencial Manejo	Potencial total	Potencial Manejo	Potencial total	Potencial Manejo	Potencial total	Potencial Manejo	Potencial total
	MW/ano		MW/ano		MW/ano		MW/ano	
Ombrófila aberta aluvial	713,6	12.261	4.364	74.997	-	-	267,1	4.590
Ombrófila aberta das terras baixas	6.089	104.631	12.203	209.682	27,0	464,4	1.915	32.905
Ombrófila aberta submontana	228,5	3.926	3.573	61.399	1.023	17.591	3.825	65.729
Ombrófila densa aluvial	37,8	650,9	9.544	163.998	1.303	22.397	80,1	1.376
Ombrófila densa submontana	34,6	594,7	14.617	251.153	7.918	136.056	471,1	8.095
Ombrófila densa das terras baixas	653,4	11.228	45.807	787.069	866,9	14.895	93,2	1.601
Ombrófila densa montana	-	-	1.054	18.110	2.597	44.633	-	-
Média	1.292	22.215	13.023	223.772	2.289	39.339	1.118	19.049

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O Amazonas, representa, atualmente, 9% da produção de toras na Amazônia, em grande parcela devido ao crescimento da atividade madeireira no sul do estado (Lentini et al., 2021). Este estado tem cerca de 4,5 milhões de habitantes, possuía, em 2005, em torno de 260 serrarias

cadastradas e conta com importantes vias de escoamento como o rio Amazonas e Solimões, portos em inúmeros municípios e as BR's 319, BR-174 e a BR-230 que o conecta ao Acre, Pará, Rondônia, Roraima, dentre outros estados (IBGE, 2022, LIMA, SANTOS; HIGUCHI, 2005). Além disso, localiza-se próximo a região central do bioma, situando-se em uma área estratégica para o transporte de matéria-prima e mão de obra.

Roraima compareceu na sequência, produzindo, em média, 2.289 MW/ano sob manejo florestal sustentável. Os maiores valores foram notados nas tipologias Ombrófila Densa Submontana e Ombrófila Densa Montana, com 7.918 MW/ano e 2.597 MW/ano, respectivamente. Considerando o potencial total, seria produzido 39.339 MW/ano. Esse estado, conta com 142 termelétricas em operação e um potencial de 572,4 MW instalados, desse total, apenas 6 empreendimentos operam utilizando algum tipo de biomassa, totalizando 56,3 MW (ANEEL, 2023).

O potencial gerado sob manejo florestal também representa apenas 6% do total de energia obtido pelo estado, que foi de, em média, 39.339 MW/ano. Observa-se que esta região poderia gerar mais e 40 vezes o potencial atual instalado mesmo que utilizasse apenas os resíduos do processamento da madeira derivadas do manejo florestal sustentável. Desse modo, a bioenergia promoveria um destino que traria benefícios econômicos, sociais e ambientais. Entre 2019 e 2020, foram produzidos cerca de 198.671 m³ de madeira em tora proveniente de áreas sob técnicas sustentáveis (IMAZON, 2022).

O Acre compareceu em seguida, observou-se um potencial de 1.292 MW/ano para a porção sob manejo sustentável, com destaque para a fitofisionomia Ombrófila Aberta das Terras Baixas, que obteve 6.089 MW/ano. Já para o potencial total, contou-se 22.215 MW/ano. Esse estado conta com 29 empreendimentos termelétricos em operação, produzindo cerca de 142 MW, do qual, apenas 1,5 MW são pertencentes à única usina de biomassa (ANEEL, 2023). O Acre, na produção de madeira em tora, não demonstra ser tão competitivo quanto o Mato Grosso e Pará. De 2019 a 2020, essa região produziu 257.545 m³, mas ainda assim, a ampliação da bioenergia é interessante para essa localidade como forma de complementação e consequentemente, diversificação da matriz energética (IMAZON, 2022). O Acre apresenta um potencial bastante interessante que na prática não é aproveitado, considerando apenas o potencial gerado sob manejo, essa região, obteria mais de 800 vezes o potencial atual. Por isso, a introdução da bioenergia, deveria ser melhor analisada.

Se utilizasse toda a biomassa disponível, a geração de energia seria de, em média, 19.049 MW/ano, mais de 3 vezes o potencial sustentável. Este estado possui 48 usinas operando atualmente, elas somam 528 MW, desse total, apenas 4 usinas funcionam à base de biomassa, produzindo 27,5 MW (ANEEL, 2023). Ressalta-se que Rondônia é uma das principais fontes de madeira em tora na Amazônia, entre 2019 e 2020, representou entre 10% e 25% do total produzido no bioma, com 1.185.295 m³, sendo o terceiro maior produtor da região (IMAZON, 2022). Abaixo, na Tabela 3.6, vê-se os dados de geração de energia obtidos pelos estados da Amazônia Oriental.

Tabela 3.6. Geração de energia a partir dos resíduos de processamento da madeira na Amazônia Oriental, considerando o potencial total e sob manejo florestal sustentável.

Tipologia florestal	Amazônia Oriental									
	Maranhão		Pará		Mato Grosso		Tocantins		Amapá	
	Potencial Manejo	Potencial total								
	MW/ano		MW/ano		MW/ano		MW/ano		MW/ano	
Ombrófila aberta aluvial	-	-	0,3	6,4	16,4	282,8	0,8	14,3	49,8	857,0
Ombrófila. aberta das terras baixas	4,1	71,3	50,8	874,0	-	-	-	-	-	-
Ombrófila aberta submontana	58,9	1.013	12.833	220.508	4.292	73.756	18,9	324,9	46,9	806,5
Ombrófila densa aluvial	3.540	60.839	6.751	116.012	182,6	3.137	21,8	375,8	1.155	19.859
Ombrófila densa submontana	617,1	10.603	31.256	537.060	1.935	33.251	43,3	745,0	7.347	126.238
Ombrófila densa das terras baixas	543,7	9.342	13.132	225.642	-	-	-	-	1.626	27.943
Ombrófila densa montana	-	-	139	2.388,6	-	-	-	-	43,6	750,4
Média	952	16.373	9.166	157.498	1.606	27.607	21,25	365	1.711	29.409

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Amazônia Oriental, o Pará, devido à grande cobertura da floresta Ombrófila (89.845.200 ha) e seus altos resultados para biomassa acima solo (318,7 Mg ha⁻¹) apresentou-se como a região mais promissora para a ampliação da bioenergia. Sob manejo, seria gerado 9.166 MW/ano, a formação florestal Ombrófila Densa Submontana abrangeu o maior potencial, 31.259 MW/ano, o segundo maior encontrado no bioma. Quando considerado o potencial total, este estado geraria, em média, 157.498 MW/ano. O Pará, detém atualmente, 77 usinas, gerando 446,6 MW, das quais, 14 indústrias operam utilizando algum tipo de biomassa e produzem cerca de 109,2 MW (ANEEL, 2023). Nota-se que o segundo maior estado do país estaria desperdiçando mais de 80 vezes o potencial atual, considerando o volume gerado apenas sob manejo sustentável.

O Pará detém a maior população do bioma, com quase 213.317.639 habitantes, demonstrando disponibilidade de mão de obra, além disso, é o segundo maior produtor de madeira em tora, entre 2019 e 2020, foi produzido 3.681.846 m³ (IBGE, 2022; IMAZON). Outro ponto importante é a sua localização estratégica, situando-se, próximo ao centro do bioma e compartilhando importante vias de escoamento com os estados vizinhos. O Pará detém uma sólida linha rodoviária, com cerca de 34.585 km, dos quais 4.390 são federais, 6.520 estaduais e 23.675 municipais. As principais rodovias são as federais BR-010, BR-163, BR-230, BR-316 e a estadual transitória PA-150/BR-158. A BR-010 é o trecho paraense da Belém-Brasília, que é uma rodovia de integração nacional e constitui a ligação rodoviária de longo alcance mais bem sucedida da Amazônia (BRASIL, 2000). Além disso, o Pará conta com importantes rios, onde o fluxo de pessoas geralmente é intenso, como o rio Amazonas, Tapajós, Xingu e Jari (BRASIL, 2023). Presume-se então, que é de suma importância que haja mais investimentos no setor energético para que se tenha um melhor aproveitamento da bioenergia e mais desenvolvimento das comunidades distantes da capital.

O Amapá compareceu em seguida, sob manejo produziria 1.711 MW/ano, onde a tipologia de maior destaque foi Ombrófila Densa Submontana, com 7.347 MW/ano. Sob o potencial total, produziria, em média, 29.409 MW/ano. Atualmente, este estado conta com apenas 6 indústrias termelétricas, 27,7 MW, na qual 1,5 MW corresponde a única usina de biomassa em funcionamento (ANEEL, 2023).

Um fato interessante é que este estado está deixando de aproveitar mais de 1.500 vezes o possível potencial que teria sob manejo florestal sustentável. Ressalta-se que esta localidade apresentou os maiores dados de biomassa acima do solo, juntamente com Roraima, e ainda que detenha a menor área da Amazônia Oriental, o Amapá demonstrou obter um potencial bastante interessante para a bioenergia. Esta região, deteve o menor volume de madeira em tora produzida durante 2019 a 2020, sendo de 187.472 m³ (IMAZON, 2022). É necessário então, que o Amapá alie as suas metas de preservação com o aproveitamento dos resíduos da madeira para tornar a sua matriz energética mais diversificada, sustentável e segura.

O terceiro lugar foi ocupado pela porção do Mato Grosso situada no bioma Amazônia. Englobando o potencial sob manejo sustentável, a energia obtida seria de 1.606 MW, com destaque para a Ombrófila Densa Submontana que gerou 4.292 MW/ano. No potencial total, observou-se que este estado produziria 27.607 MW/ano. O Mato Grosso detém 77 usinas termelétricas, funcionando com cerca de 1.052 MW. Em relação aos empreendimentos que utilizam a biomassa como matéria-prima, contou-se 27, operando com 478,8 MW, o maior potencial a base de biomassa instalado no bioma (ANEEL, 2023). Nesse sentido, esse estado utiliza a biomassa – não necessariamente do resíduo da madeira – mais que a maioria dos estados Amazônicos. Ainda assim, essa localidade está perdendo, em teoria, 3 vezes o potencial atual instalado. Considerando os dados provenientes do relatório elaborado pelo Imazon em 2022, o Mato Grosso foi o principal produtor de tora na Amazônia, durante 2019 a 2020, com 4.693.279 m³, volume esse, que poderia estar sendo direcionado para a bioenergia (IMAZON, 2022).

O Maranhão obteria, sob manejo, 952 MW/ano, e sob potencial total, 16.373 MW/ano, com destaque para a vegetação Ombrófila Densa Aluvial que geraria 3.540 MW/ano. Atualmente, neste estado, funcionam 28 usinas termelétricas, originando 2.968 MW, o maior potencial da região Amazônica. Desse total, 6 indústrias utilizam a biomassa, somando 281,6 MW (ANEEL, 2023). O Maranhão poderia apresentar dados ainda maiores, no entanto, esta localidade possui áreas de transição de vegetação entre Amazônia (úmida) e Cerrado (semiárido) (MARANHÃO, 2011). Além disso, está situada sob uma das áreas mais afetadas pelo arco do desmatamento, nessas regiões, vê-se uma profunda alteração da paisagem natural, com extensas áreas de florestas convertidas em uso alternativo do solo (MARANHÃO, 2011).

A porção do Tocantins situada na Amazônia não apresentou dados muito relevantes quando comparada aos demais estados. Observou-se que, sob manejo sustentável, seria

produzido 21,25 MW/ano, a vegetação Ombrófila Densa Montana produziu os melhores resultados, com 43,3 MW/ano. O Tocantins detém 27 usinas termelétricas, que geram 110 MW, sendo que 2 usinas funcionam utilizando a biomassa como fonte e geram, 91,5 M. Nesse sentido, ainda que o potencial tenha sido menor, ainda é interessante o incentivo da bioenergia nessa localidade.

3.4 CONCLUSÃO

Este estudo carrega uma grande importância, pois incentiva a diversificação da matriz elétrica da Amazônia, onde atualmente utiliza-se, sobretudo, hidrelétricas e termelétricas à óleo diesel. Possibilita ainda, contabilizar para uma melhor gestão, o recurso florestal total e sob manejo disponível, bem como, o potencial de geração de energia.

Este estudo analisou a produção de bioenergia na Amazônia com base nos resíduos derivados do processamento da madeira. Contabilizou-se o volume de biomassa disponível e a geração de energia, considerando a biomassa total e a biomassa sob manejo florestal sustentável, utilizou-se somente a tipologia ombrófila visto que é a vegetação predominante na região. Abrangendo a geração de biomassa acima do solo, os estados que apresentaram os melhores resultados foram o Amapá, Roraima e Pará. Quanto a geração de bioenergia, o estado do Amazonas destacou-se dentre os demais e foi seguido pelos estados do Pará e Roraima.

3.5 REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. Sistema de Informação de Geração da Aneel, SIGA. 2023. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd_kNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9. Acesso em: março 2023.

ALVARES, C. A *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.

AVITABILE, V. *et al.* An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global Change Biology*, v. 22, n. 4, p. 1406-1420, 2016.

BACCINI, A. G. S. J. *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.

BARNI, P. E. *et al.* Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 377, p. 170-181, 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 406, de 02 de fevereiro de 2009**. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. Brasília, 2009.

BRASIL. **Ministério da Infraestrutura. Transportes no Pará Maio de 2000**. 2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pa-2000-pdf>. Acesso em: março 2023.

BRASIL. **Ministério da Infraestrutura. Bacia Amazônica Oriental**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/conteudo/portos-e-transporte-aquaviario/bacia-amazonica-oriental>. Acesso em: março 2023.

BRIENEM, R. J. W. ET AL. Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, v. 519, n. 7543, p. 340–353, 2015.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science, Lawrence**, v. 35, p. 881-902, 1989.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. **Interciencia**, v. 17, n. 1, 8-18, 1992.

CAZZOLATO, J. D. Censo 2020 - novas Macrorregiões, 50 anos depois. **Fronteiras. Revista franco-brasileira de geografia / Revista franco-brasileira de geografia**. n. 46, 2020

CENBIO. **Centro Nacional de Referência em Biomassa**. Atlas da Bioenergia do Brasil. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 – MME. São Paulo, 2009.

COELHO, S. T.; PALETTA, C. E. M.; FREITAS, M. A. V. **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**. Dupligráfica Ed./ANEEL/CENBIO/BUN/MCT, PNUD, 2000.

DE ALMEIDA MATOS, F. D.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa da Floresta Ombrófila Densa de terra firme na Amazônia Central com o satélite IKONOS II. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008.

FEARNSIDE, P. M.; LEAL, N.; FERNANDES, F. M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D9, 1993.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I.; PEREIRA, V. B. Emissões de gases do efeito estufa por desmatamento e incêndios florestais em Roraima: fontes e sumidouros. **Revista Agroambiente On-line**, v. 7, n. 1, p. 95-111, 2013.

FEARNSIDE, P. **Deforestation of the Brazilian Amazon. In: Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science.** Shugart, H. (Ed.), Oxford University Press. Nova York, EUA, 52p. 2017.

FEITOSA, B. da C. Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará. **Revista da Madeira**, n. 144, 2008.

FERREIRA, E. C. **Uso de Produtos Florestais Não Madeireiros em Projeto de Assentamento Agroextrativista na Amazônia.** *Espacios*, v. 37 (No 38), n. January, p. 19, 2016.

FERREIRA, A. B. F. **Modelagem da biomassa e dinâmica do carbono em áreas de concessão florestal no Sudeste da Amazônia brasileira.** 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Forest Inventory. 2023.** Disponível em: <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/forestinventory/basic-knowledge/zh/>. Acesso em: 06 jan 2023.

FONSECA, A. et al. **Boletim do desmatamento da Amazônia Legal** (agosto de 2017) SAD (p. 1). Belém: Imazon. 2018

FRENCH, N. et al. Remote Sensing for Mapping and Modeling of Land-Based Carbon Flux and Storage. In: FRENCH, N. et al. *Land use and the carbon cycle: advances in Integrated science, management, and policy.* New York: Cambridge University Press, 2013. p. 95-143.

HOMMA, A. K. O. **Madeira na Amazônia: extração, manejo ou reflorestamento?.** 2011.

HOUGHTON, R.; HALL, F.; GOETZ, S. **Importance of biomass in the global carbon cycle.** *Journal of Geophysical Research*, v. 114, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e estados.** 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira.** 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite.** 2022. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: março 2023.

IMAZON. **Amazônia perdeu quase 3 mil campos de futebol por dia de floresta em 2022, maior desmatamento em 15 anos.** 2022. Disponível em: <https://imazon.org.br/imprensa/amazonia-perdeu-quase-3-mil-campos-de-futebol-por-dia-de-floresta-em-2022-maior-desmatamento-em-15-anos/>. Acesso em: 20 março 2023.

IMAZON. **A evolução do setor madeireiro na Amazônia.** 2022. Disponível em: <https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2022/06/Evolucao-do-Setor-Madeireiro-na->

[Amazonia-de-1980-a-2020.pdf](#). Acesso em: março 2023.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. Exemplos de Aplicação de cokrígagem, UNESP / Campus de Rio Claro. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE. Texto Didático – 09. 2002.

LAURANCE, W. F. *et al.* Ecology and Management, Amsterdam, v. 118, n. 1-3, p. 127-138, 1999.

LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. Above-ground biomass. In: LIANG, S.; LI, X.; WANG, J. (Eds.) **Advance remote sensing: terrestrial information extraction and applications**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2012. 799 p. ISBN 978-0-12 385954-9. cap. 15, p. 467-499.

LIMA, J. R. A; SANTOS, J. dos.; HIGUCHI, Niro. Situação das indústrias madeireiras do estado do Amazonas em 2000. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 125-132, 2005.

MAIA ARAÚJO, T.; HIGUCHI, N.; DE CARVALHO, J. A. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Para, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 117, n. 117, p. 43-52, 1999.

MAPBIOMAS. Visão geral da metodologia. Disponível em: <https://mapbiomas.org/pages/atbd>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MAPBIOMAS. Guia de boas práticas para implementação do embargo remoto de áreas desmatadas no Brasil. - São Paulo, Brasil - IDS, ICV, Brasil.io e MapBiomias, 2022a.

MAPBIOMAS. Desmatamento cresce 29% em 2021 e é o maior dos últimos 10 anos. 2022b. Disponível em: <https://amazon.org.br/imprensa/desmatamento-na-amazonia-cresce-29-em-2021-e-e-o-maior-dos-ultimos-10-anos/>. Acesso em 22 março 2023.

MAPBIOMAS. Relatório anual do desmatamento no Brasil em 2020. São Paulo, Brasil - MapBiomias, 2021.

MARANHÃO. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no estado do Maranhão**. São Luís: Secretaria de Estado de Meio Ambiente - SEMA, 2011.

MARTINELLI, L. A. *et al.* Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais. Seminário Emissão X Sequestro de CO₂—Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil, Rio De Janeiro. **Anais... Rio de Janeiro: CURD**, p. 197-221, 1994.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Legislação da Amazônia**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudam/pt-br/acesso-a-informacoes/institucional/legislacao-da-amazonia>. Acesso em: 08 jan 2023.

MERCANTE, A. L. P. **Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar**. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Uso e Cobertura da Terra na Floresta Amazônica**. p. 154, 2006. Disponível em:

http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/amazonia/documentos/relatorio_final.pdf. Acesso em: 04 mar. 2020.

MITCHARD, E. T. A. *et al.* Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. **Global Ecology and Biogeography**, v. 23, n. 8, p. 935–946, ago. 2014.

MOTA, E. R. *et al.* Diversidade, distribuição espacial e espécies arbóreas estruturantes em Floresta Ombrófila Densa na Amazônia Oriental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 71192-71208, 2020.

NASA. Deforestation patterns in the Amazon. 2004. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/4385/deforestation-patterns-in-the-amazon>. Acesso em: março 2023.

NEPSTAD, D.; CARVALHO, G.; BARROS, A. C.; ALENCAR, A; CAPOBIANCO, J. B.; BISHOP, J; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P. e SILVA, U. L. “Road Paving, Fire Regime Feedbacks, and the Future of Amazon Forests”. **Forest Ecology and Management** 5524, 2001, pp. 1-13. 2001.

OBE, R.; HSU, L. **PostGIS in action**. Simon and Schuster, 2021.

OVIEDO, A.; LIMA, W. P; AUGUSTO, Cicero. **O arco do desmatamento e suas flechas**. 2019.

DE OLIVEIRA PIVA, L. R. *et al.* Estoques de biomassa e carbono na Amazônia brasileira: uma nova abordagem. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. Supl. 2, p. 1-20, 2021.

PERIGOLO, N. A.; DE MEDEIROS, M. B.; SIMON, M. F. Vegetation types of the upper Madeira River in Rondônia, Brazil. **Brittonia**, v. 69, n. 4, p. 423-446, 2017.

RAMÍREZ, F. L. B. Modelagem de biomassa acima do solo e emissões de carbono associadas a mudanças na cobertura da terra na Floresta Tropical Amazônica Equatorialiana. **São José dos Campos: INPE. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto)**, 2015.

RATUCHNE, L. C. *et al.* Estado da Arte na Quantificação de Biomassa em Raízes de Formações Florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 450–462, 2016.

REN21. **Annual Report 2019**. AIMS Mathematics. V.5, n. 1, p. i-v, 20200.

ROMERO, F. M. B. *et al.* Forest management with reduced-impact logging in amazonia: Estimated aboveground volume and carbon in commercial tree species in managed forest in Brazil’s state of acre. **Forests**, v. 12, n. 4, p. 481, 2021.

SAATCHI, S. S. *et al.* Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global change biology**, v. 13, n. 4, p. 816-837, 2007.

SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. A.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 24, p. 9899-9904, 2011.

SANTOS, E. G. D. *et al.* Multi-scale approach to estimating aboveground biomass in the Brazilian Amazon using Landsat and LiDAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 22, p. 8635-8645, 2019.

SCHEPASCHENKO, D. *et al.* The Forest Observation System, building a global reference dataset for remote sensing of forest biomass. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 198, 10 dez. 2019.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTAL DO AMAPÁ. Unidades de Conservação. 2022. Disponível em: <https://sema.portal.ap.gov.br/conteudo/servicos-e-informacoes/unidades-de-conservacao>. Acesso em: março 2023.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Plano Anual de Outorga Florestal 2020**. MAPA. Brasília, 2019.

SILVA, C. A. *et al.* Fire Occurrences and Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in the Brazilian Amazon. *Remote Sens.* 2021, 13, 376. 2021.

SOARES-FILHO, B. S. *et al.* Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520-523. 2006.

SOUZA, K. de. B. **Modelagem atual e futura de biomassa e estoques de carbono associadas a mudanças na cobertura da terra no bioma Amazônia**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro – ES. 2020.

SULLIVAN, M. J. P. *et al.* Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. **Nature Publishing Group**, n. October 2016, p. 1–12, 2017.

STEELE, P. H. Factors determining lumber recovery in sawmilling. Madison: US. Forest Service. 1984, 8 p. (General Technical Report. FPL, n. 39).

TEIXEIRA, T. R. *et al.* Forest biomass power plant installation scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 35-47, 2018.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE – Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, M. Pólos madeireiros do estado do Pará. *IMAZON*, Belém, p. 72, 2002

WOORTMANN, C. P. I. B. **Equações alométricas, estoque de biomassa e teores de carbono e nitrogênio de campinaranas da Amazônia central**. 2010.

4 ARTIGO 3 – LOCALIZAÇÃO ÓTIMA PARA INSTALAÇÃO DE TERMELÉTRICAS FLORESTAIS NO BIOMA AMAZÔNIA

RESUMO

Devido a distribuição espacial da biomassa florestal no bioma Amazônia, dos aglomerados humanos e vias de escoamento, como rios e estradas. É essencial pensar em localidades estratégicas que ofereçam os maiores benefícios ao se instalar uma usina termelétrica. Nesse contexto, este estudo analisou a localização ótima para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia. A metodologia, foi desenvolvida em ambiente SIG, foi utilizado o aplicativo ARCGis, versão 10.5. Empregou-se dois modelos de alocação, no primeiro, para encontrar as áreas aptas, excluiu-se as áreas impróprias. Considerou-se restrições legais, ambientais ou estratégicas, as regiões resultantes após a exclusão das áreas inapropriadas foram consideradas como áreas potenciais para receber as termelétricas. No segundo, apenas as áreas urbanas do bioma seriam regiões potenciais. Configurou-se os modelos para alocar 5 termelétricas por estado, na qual a biomassa poderia ser fornecida a partir de duas distâncias, sendo 50 km e 100 km. Calculou-se a biomassa florestal disponível e o potencial de energia que seria gerado com base nos resíduos do processamento da madeira comercial. Os resultados mostraram que as usinas dispostas nas localidades potenciais apresentaram valores superiores de geração de energia elétrica por estarem em maior quantidade. As usinas de Roraima e Amapá concentraram os melhores resultados, suas termelétricas gerariam mais energia e teriam uma vida útil maior. Este estudo permitiu observar quais locais teriam maior potencial para estabelecer uma geração de bioenergia na Amazônia, tais informações são de extrema importância para a ampliação do uso da bioenergia nessa localidade.

Palavras-chave: localização ótima. Termelétricas. Amazônia. Biomassa florestal.

PAPER 3 – GREAT LOCATION FOR THE INSTALLATION OF FOREST THERMOELECTRIC PLANTS IN THE AMAZON BIOME

ABSTRACT

Due to the spatial distribution of forest biomass in the Amazon biome, human settlements and drainage routes, such as rivers and roads. It is essential to think of strategic locations that offer the greatest benefits when installing a thermoelectric plant. In this context, this study analyzed the optimal location for installing forest thermoelectric plants in the Amazon biome. The methodology was developed in a GIS environment, using the ARCGIS application, version 10.5. Two allocation models were used, in the first one, to find the suitable areas, the unsuitable areas were excluded. Legal, environmental or strategic restrictions were considered, the resulting regions after the exclusion of inappropriate areas were considered as potential areas to receive thermoelectric plants. In the second, only the urban areas of the biome would be potential regions. The models were configured to allocate 5 thermoelectric plants per state, in which the biomass could be supplied from two distances, 50 km and 100 km. The available forest biomass and the energy potential that would be generated based on commercial wood processing residues were calculated. The results showed that the plants arranged in potential locations had higher values of electricity generation because they were in greater quantity. The Roraima and Amapá plants concentrated the best results, their thermoelectric plants would generate more energy and have a longer useful life. This study made it possible to observe which locations would have the greatest potential to establish a generation of bioenergy in the Amazon, such information is extremely important for expanding the use of bioenergy in that location.

Keywords: great location. Thermoelectric. Amazon. Forest biomass.

4.1 INTRODUÇÃO

Uma matriz elétrica diversificada torna o fornecimento mais seguro, diminui o risco de preços mais elevados no mercado e gera, sobretudo, desenvolvimento econômico à uma região (TEIXEIRA et al., 2018). Em 2022, 7 dos 9 estados situados no bioma Amazônia foram atendidos, em parte, pelos Sistemas Isolados de energia elétrica – SISOL. Eles, são caracterizados por não estarem conectados eletricamente ao restante do país, seja por barreiras ambientais, econômicas ou sociais (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, 2021). Em muitas localidades da Amazônia, o suprimento de eletricidade ainda é limitante. Em 2019, o número de pessoas sem acesso a este recurso foi estimado em 990 mil habitantes (COSTA; VILLALVA, 2020).

Na geração de energia, os SISOL utilizam como principal combustível o óleo diesel, sendo responsável por mais de 90% do fornecimento anual (SISOL, 2021). Esse recurso possui preços altamente elevados e passível de sofrer forte oscilação do mercado. Além disso, é prejudicial ao meio ambiente uma vez que emite quantidades consideráveis de CO₂ e material particulado, contribuindo para a intensificação do efeito estufa (ONS, 2021). Em 2021, contabilizou-se, no bioma Amazônia, cerca de 660 termelétricas funcionando com óleo diesel, sendo a segunda região do país com o maior número dessas indústrias (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2021). Observa-se então, a predominância no uso de combustíveis fósseis e a necessidade de diversificação da matriz elétrica local, principalmente com fontes limpas de energia.

O bioma Amazônia possui uma área de 4,2 milhões de km² e cobre 49.29% do território brasileiro (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2018; SILVA et al., 2021). 79% dessa região é composta por vegetação natural e estima-se um estoque de 60 bilhões de m³ de madeira, tornando-a detentora da maior reserva de madeira tropical do mundo (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2008; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO – SBF, 2019). Nesse sentido, a bioenergia é uma opção interessante para a região, essa energia renovável, é derivada da transformação da biomassa em eletricidade, em energia térmica e biocombustíveis (MERCANTE, 2021). A bioenergia é a terceira fonte mais utilizada no país, representando 8.73% do total. Entretanto, nos estados amazônicos, corresponde a apenas 0,7% (ANEEL, 2021; ONS, 2021).

Quando analisado a dificuldade ao acesso de energia na Amazônia, pode-se inferir que

economia de uma região está condicionada, entre outros fatores, à distribuição espacial dos recursos ambientais, aglomerados humanos (mão de obra e consumo), áreas industriais e vias de escoamento, como rios e estradas (TEIXEIRA, 2016). Para instalação de um empreendimento, deve-se analisar o processo como um todo, mirando, sobretudo, na maximização do lucro, contabilizando o preço da mão de obra, da matéria-prima e dos combustíveis, o tempo de entrega do produto, possíveis rotas alternativas e proximidade do consumidor (ALVES, 1983; COSTA, 2014; COMBER et al., 2015; DONDA JUNIOR, 2002).

A escolha das melhores localizações é um processo complexo, envolve questões econômicas, sociais e ambientais. Os custos da matéria-prima, a distância da usina em relação a floresta, às serrarias e aos consumidores pode definir o sucesso ou fracasso de um empreendimento (COMBER et al., 2015). Esses critérios, podem ser incluídos em uma análise de localização através dos Sistemas de Informação Geográfica – SIG – que possuem diversas ferramentas para auxiliar a encontrar a melhor solução. Este recurso, caracteriza-se por processar dados gráficos e não gráficos com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, 2006).

As análises de localização-alocação buscam identificar o conjunto n de locais ótimos, considerando a distribuição espacial da oferta e demanda (COMBER et al., 2015). Os modelos de alocação são desenvolvidos em ambiente SIG e as localizações potenciais são avaliadas segundo critérios, normalmente, é a distância em relação a demanda e a floresta, tempo de viagem e custos (COMBER et al., 2015).

Sánchez-García et al. (2017) utilizaram SIG para verificar a localização ótima para uma nova usina movida a biomassa florestal em Asturias, na Espanha. Chukwuma (2019) também utilizou para estimar as melhores áreas para a instalação de termelétricas de bioenergia no estado de Anambra, na Nigéria. Seguindo o mesmo raciocínio dos estudos mencionados, Costa et al. (2020) identificaram as áreas potenciais para o emprego de usinas movidas à resíduos florestais industriais em Minas Gerais, Brasil.

Considerando a importância estratégica, a complexidade econômica, ambiental e social de empreendimentos bioenergéticos e o potencial produtivo de biomassa florestal na Amazônia. O objetivo do presente estudo foi identificar a localização ótima para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia da presente pesquisa foi desenvolvida em ambiente SIG, no software Arcgis versão 10.5. Primeiramente, realizou-se os procedimentos para encontrar a localização ótima para instalação de termelétricas florestais. Posteriormente, calculou-se a geração de energia com base na biomassa disponível que iria suprir a necessidade elétrica das usinas. Por fim, elaborou-se os modelos de distância de busca de biomassa para tornar o projeto viável.

- **Área de estudo**

O bioma Amazônia cobre totalmente os dois maiores estados em extensão do país, Amazonas e Pará, respectivamente, também abrange os estados do Acre, Roraima, Rondônia, Amapá e partes do Mato Grosso, Tocantins e Maranhão, como exposto na Figura 4.1 (CAZZOLATO, 2020).

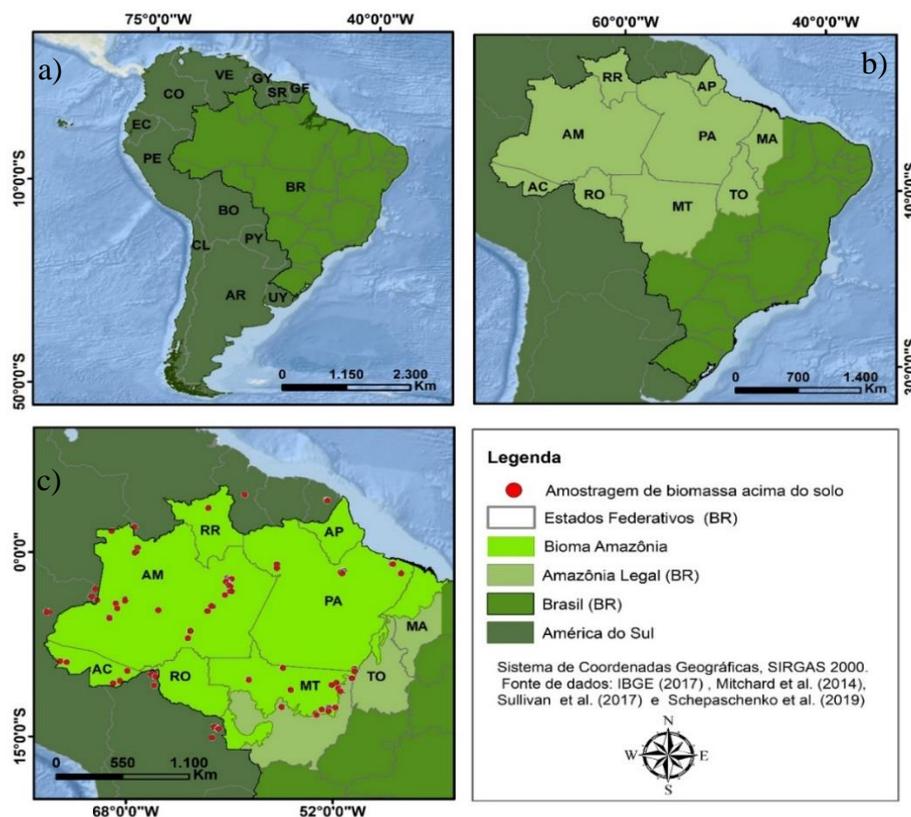


Figura 4.1. a) Distribuição do continente América do Sul, com destaque para o Brasil. b) Distribuição do bioma Amazônia em território brasileiro. c) amostras de biomassa acima do solo disponibilizadas por Mitchard et al. (2014); Sullivan et al. (2017) e Schepaschenko et al. (2019).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Ao todo, a Amazônia concentra aproximadamente 25 milhões de habitantes e 553 municípios (IBGE, 2020). Essa região possui clima quente e úmido (ALVARES, 2013), apresenta vegetação composta, sobretudo, pela fitofisionomia ombrófila densa (49%), isto é, o seu desenvolvimento depende do regime de águas pluviais abundantes e constantes, apresentando alto volume de vegetação em todos os estratos arbóreos (PINHEIRO, 2018). Hubbell et al. (2008) estimaram em torno de 11.120 espécies arbóreas na Amazônia, sendo essa região, a principal fonte de madeira de florestas nativas do Brasil (DA SILVA LUZ et al., 2021).

- **Processamento de dados**

O processamento foi realizado individualmente nos estados do Bioma Amazônia, visando melhor apresentação dos resultados. No entanto, devido a extensão territorial dos estados do Pará e Amazonas, observou-se a necessidade de utilizar as suas mesorregiões. (Figuras 4.2, a e b).

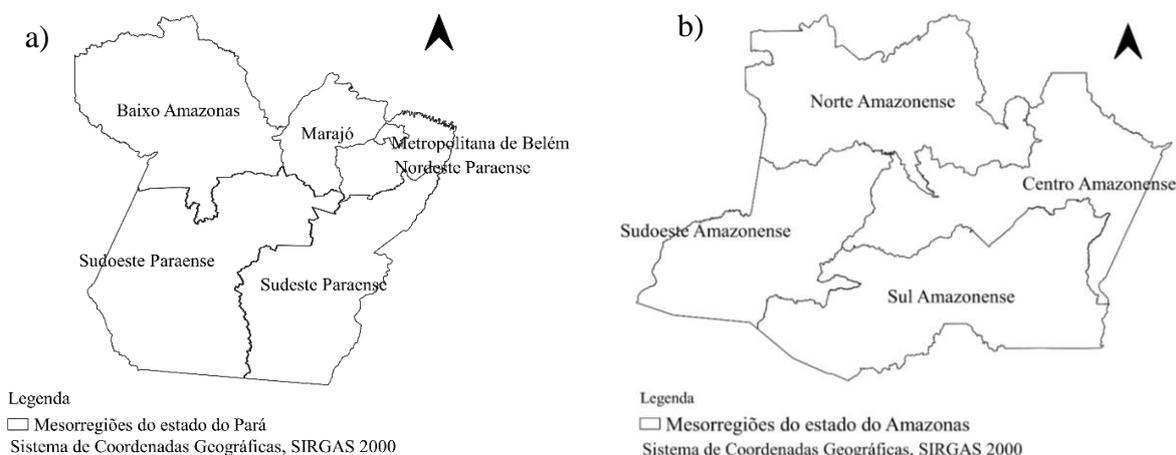


Figura 4.2. a) Mesorregiões do estado do Pará. b) Mesorregiões do estado do Amazonas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para o processamento dos resultados, os estados foram divididos em dois grupos: Amazônia ocidental, formada pelo Amazonas, Acre, Rondônia e Roraima, e Amazônia oriental constituída pelo Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021).

- **Banco de dados para as zonas restritivas**

Visto que nem todas as áreas podem comportar empreendimentos como termelétricas, elaborou-se um banco de dados com áreas impróprias. Considerou-se questões legais, ambientais ou estratégica (TEXEIRA et al., 2018). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – forneceu arquivos vetores para as unidades de conservação e terras indígenas. Para os aeródromos, ferrovias, rodovias e hidrografia coletou-se vetores do site do Ministério da Infraestrutura. Os dados para linhas de transmissão e usinas termelétricas foram retirados do Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL. As áreas de assentamento foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA – enquanto as áreas urbanizadas foram retiradas do IBGE, assim como os manguezais. O vetor para o processamento das áreas potenciais com base nos centros urbanos foi fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA.

- **Exclusão das áreas impróprias para instalação de termelétricas de base florestal**

As zonas de exclusão corresponderam às seguintes feições: Aeródromos, Áreas urbanas, Assentamentos, Ferrovias, Hidrografia, Linhas de transmissão, Rodovias, Terras indígenas, Unidades de Conservação e Manguezais. Vetores como unidades de conservação, reservas indígenas e assentamentos já possuem suas delimitações destacadas em polígonos. Já as áreas urbanas e a hidrografia, por exemplo, necessitam de parâmetros de distância mínima para instalação de empreendimentos potencialmente poluidor nas proximidades, como vê-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Restrições consideradas na instalação de usinas termelétricas de base florestal no bioma Amazônia.

Feições	Restrições	Fonte
Aeródromos	Distância \leq 20 km	CONAMA nº 4 de 1995
Terras indígenas	Polígono	-
Manguezais	Polígono	-
Assentamentos	Polígono	-
Corpos hídricos	Distância \leq 200 m	Portaria MINTER nº 124 de 1980
Áreas urbanas	Polígono + Distância \leq 1 km	IBGE (2018) + Sultana e Kumar (2012).
Ferrovias	Distância \leq 30 m	Sultana e Kumar (2012).
Rodovias	Distância \leq 30 m	Sultana e Kumar (2012).

Linhas de transmissão	Distância \leq 30 m	Sultana e Kumar (2012).
UC* - Uso Sustentável	Polígono	-
UC - Proteção Integral	Polígono + Distância \leq 10 km	CONAMA nº 13 de 1990

*Unidade de Conservação

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

- **Áreas aptas à instalação de termelétricas de base florestal**

O processamento para encontrar os pontos candidatos para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia foi realizado por duas vias. Na primeira, toda a área resultante após a exclusão das áreas impróprias foi considerada como área potencial, isto é, sem restrições. Para espacializar as usinas candidatas, criou-se uma malha de pontos equidistantes de 20 em 20 km, empregando-se a ferramenta *Fishnet*.

No segundo cenário, foi considerado que apenas as áreas urbanas apresentaram potencial para abrigar tais empreendimentos. Esta feição, é apresentada em polígono, no entanto, para simularmos as áreas potenciais, eles foram transformados em pontos, cada um representando um município, sendo no total, 500. Essa ação foi realizada através da ferramenta *extract values to points*. Desse modo, todos os pontos eram localizações candidatas.

Comber et al. (2015) menciona que termelétricas instaladas em áreas urbanas apresentam inúmeros benefícios. O processo de geração de energia é mais econômico e sustentável uma vez que a matéria-prima e a mão de obra pode vir da própria região. A população passa a ter mais contato e conhecimento acerca das energias renováveis, além de proporcionar maior crescimento econômico e desenvolvimento.

- **Banco de dados para espacialização da biomassa acima do solo**

Primeiramente, coletou o vetor de mudança do uso e cobertura da terra para o ano de 2017, utilizou-se a coleção 3.0 com resolução espacial de 30 metros, tais informações foram derivadas do projeto *MapBiomass*. Os dados de precipitação foram fornecidos pelo projeto *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)*, da NASA. Caracteriza-se por ser uma reanálise atmosférica referente a era moderna de satélites, gerando imagens desde 1980 até atualmente. A resolução da reanálise é de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ em latitude e longitude, respectivamente, e foi obtida em mm/mês. Dessa forma, foram utilizadas

imagens mensais para compor uma única imagem anual.

As fitofisionomias florestais foram configuradas a partir do mapa de vegetação fornecido pelo IBGE, em uma escala de 1:250.000, na versão 2017. Esse mapa foi formado com base nas imagens do sensor do satélite *LM Landsat* e a definição das fitofisionomias segue o Manual técnico da vegetação brasileira (IBGE, 2012) e Veloso; Rangel-Filho e Lima, (1991). As áreas antropizadas como influencia urbana, pastagens, áreas agrícolas e vegetação secundária, foram retiradas com o intuito de deixar apenas as áreas de vegetação original.

Para a espacialização da biomassa acima do solo, utilizou-se informações dos pontos estimados por Mitchard et al. (2014) e Sullivan et al. (2017), disponibilizados no site *Rede Amazônica de Inventários Florestais* (RAINFOR) e Schepaschenko et al. (2019), proveniente do site *Forest Observation System* (FOS), resultando em 420 pontos amostrais, como observado na Figura 4.1. As informações sobre os dados de biomassa já vieram previamente calculadas em Mg ha^{-1} e cada ponto amostral continha informações para 1 hectare.

Todas as imagens que compõe o banco de dados foram configuradas para o sistema de projeção Cônica Equivalente de Albers. Essa projeção caracteriza-se por não deformar as áreas, ou seja, os territórios presentes no mapa guardam uma alta relação com as suas medidas correspondentes na superfície terrestre (IBGE, 2019).

- **Distribuição da biomassa acima do solo**

Empregou-se quatro técnicas da geoestatística a fim de analisar a espacialização da biomassa acima do solo. Foram elas: a krigagem ordinária (krig ord), a cokrigagem, com a variável auxiliar sendo a vegetação por fitofisionomia (cokrig-veg), a cokrigagem, utilizando como variável auxiliar o mapa de vegetação por classe de fitofisionomia florestal e a precipitação média anual (cokrig-veg-prec). Por último, empregou-se a cokrigagem tendo como variável auxiliar a precipitação média anual (cokrig-prec).

A geoestatística trabalha com a predição de valores em pontos não amostrados, seja para elaboração de mapas por meio da krigagem, ou na modelagem de determinada variável (SILVA JUNIOR et al., 1987). A krigagem é um método de interpolação na qual usa-se a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro de uma área (BURGESS; WEBSTER, 1980). Já a Cokrigagem, é um procedimento onde várias variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, utilizando-se a covariância entre elas. Este método é interessante quando o principal atributo de estudo é escasso, e os atributos secundários

são mais abundantes (LANDIM, 2003). Para a realização desta técnica, é necessário primeiramente, modelar o semivariograma cuja a sua modelagem associa a variabilidade da estimativa entre dois pontos amostrais baseados na distância que os separam. A influência será maior ou menor de acordo com a distância entre os pontos (LANDIM, 2003).

O banco de dados montado para a espacialização da biomassa acima do solo foi aleatoriamente subdividido em duas subamostras: um conjunto com 10% das amostras e outro conjunto com 90% das amostras. O primeiro conjunto correspondente a 10% dos dados foi utilizado para a validação e determinação do melhor modelo de interpolação após a obtenção dos mapas de BAS conforme a metodologia de Barni et al. (2016). Para as técnicas de espacialização, empregou-se a ferramenta *Geostatistical Analyst*.

Analisou-se os interpoladores por meio da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) proposto por Hengl (2009) (Equação 4.1), Erro Quadrático Médio (EQM) sugerido por Phillips; Dolph; Marks (1992) (Equação 4.2), percentual de eficiência (EF%) levantado por Greenwood; Neeteson; Draycott (1985) (Equação 4.3), coeficiente de determinação ajustado (R²) (Equação 3.4), coeficiente de correlação (r) (Equação 4.5), índice de concordância proposto por Willmott (1981) (Equação 4.6) e índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas, (1996) (Equação 4.7) (BARNI et al., 2016).

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_{obs}(X_i) - Z_{est}(X_i)]^2 \right\}^{0,5} \quad (4.1)$$

Onde:

n : número de valores utilizados na validação;

$Z_{obs}X_i$: o valor estimado da propriedade no i -ésimo ponto; e

$Z_{est}X_i$: valor observado da propriedade no i -ésimo ponto.

É presumido que quanto maior for o valor do RMSE, maior é a superestimação dos valores de biomassa pelo modelo em avaliação.

$$EQM = \frac{\sum_1^n (Ei - Oi)}{n} \quad (4.2)$$

Onde:

EQM : erro quadrático médio;

O_i : valores observados nos pontos do conjunto de teste;

E_i : valores estimados pelos interpoladores em cada ponto; e

n : número de observações (correspondente ao conjunto com 10% das amostras).

Neste caso, também se pressupõe que quanto maior o valor do EQM , maior é a superestimação dos valores de biomassa.

$$\%EF = 100x \left(\frac{\sum_i^n (E_i - O_i)^2}{\sum_i^n (E_i - \hat{O})^2} \right) \quad (4.3)$$

Onde:

$EF\%$: percentual de eficiência;

E_i : valores estimados pelos interpoladores;

O_i : valores observados nos pontos do conjunto de teste; e

\hat{O} : média dos valores observados na amostra reservada.

Presume-se que quanto maior o valor encontrado de $\%EF$, menor é a eficiência do modelo em estimar a biomassa.

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - (p + 1)} \right) (1 - R_p^2) \quad (4.4)$$

R_a^2 coeficiente de determinação ajustado;

n : tamanho da amostra;

p : número de variáveis independentes; e

R_p^2 : coeficiente múltiplo de determinação

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.5)$$

r : coeficiente de correlação de Pearson e

x e y : valores da série observada e da série linear gerada, respectivamente.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(E_i - O_i) + (O_i - \bar{O})]^2} \quad (4.6)$$

d : índice de concordância ou ajuste;

O_i : valores observados nos pontos do conjunto de teste;

E_i : valores estimados pelos interpoladores em cada ponto; e

\bar{O} : média dos valores observados na amostra reservada.

Por meio do teste, presumiu-se que os valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita).

$$c = r \times d \quad (4.7)$$

Onde:

Em que,

c : índice de confiança ou desempenho (c);

r : coeficiente de correlação; e

d : índice de concordância

O teste indica que os valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita).

Os parâmetros foram calculados a partir da subamostra de pontos e comparados com os valores estimados pelos quatro métodos nas mesmas Coordenadas. Utilizou-se também um teste de médias (Teste-t) entre os valores previstos pelos quatro modelos e os valores da amostra a fim de comparar e verificar se os resultados diferem ou não da média da amostral (BARNI et al., 2016). Para isso, foi empregado o *software R Core Team* (2018), versão 1.1.456.127. Para a espacialização da biomassa acima do solo, utilizou-se o melhor modelo entre as quatro técnicas de krigagem utilizada. Desse modo, obteve-se o conteúdo de biomassa por classe de fitofisionomia.

O produto resultante da cokrigagem foi um arquivo raster correspondente ao bioma Amazônia. Uma imagem raster é composta por pixels – pequenas células – onde cada uma carrega um valor específico de uma área e faz parte da composição da imagem (FISHER, 1997).

Na presente pesquisa, projetou-se a dimensão dos pixels para 1 km x 1 km e cada um, representou 100 ha.

- **quantificação da biomassa acima do solo no bioma Amazônia**

Para a espacialização dos pontos de biomassa, a primeira etapa consistiu em unir as feições rodovias, hidrografia e linhas de transmissão, pois são importantes pontos de escoamento. Posteriormente, aplicou-se um buffer de 50 km a partir dessas feições visando limitar a área de busca de biomassa de modo que não ficasse tão distante das vias de escoamento. Segundo o site do Arcgis, o intuito do buffer é limitar os pontos de biomassa à uma distância viável, concentrando-os apenas àquela área, melhorando assim, a viabilidade do projeto. Na literatura, observou-se parâmetros de distância entre 50 km a 100 km (SULTANA; KUMAR, 2012; TEXEIRA et al., 2018)

Para a quantificação da biomassa, utilizou-se a imagem raster gerada na etapa anterior. Recortou-se o vetor buffer considerando a imagem, utilizando a ferramenta *Fishnet* e criou-se uma malha com pontos equidistantes de 20 em 20 km, abrangendo toda a extensão dos estados. Visando calcular o volume de cada área da malha, empregou-se a ferramenta *Zonal Statistics*. Essa ferramenta tem o objetivo de calcular estatísticas de valores no formato matricial *raster*, desse modo, obteve-se a somatória de todos os pixels da imagem matricial dentro de cada área de 20 km². Posteriormente, processou-se o ponto central de cada área (20 km²), empregando a ferramenta *Extract Values to Points*, e obteve-se os valores de biomassa total disponível em cada ponto.

- **Cálculo do potencial Energético com base nos resíduos de madeira derivadas de manejo florestal sustentável**

Com os dados de biomassa total já conhecidos, calculou-se a biomassa disponível sob manejo florestal sustentável. Para isso, utilizou-se os dados fornecidos pelo estudo de Romero et al., (2021). A pesquisa foi realizada em uma área de 1253 ha, no município de Porto Acre (AC), no sudoeste da Amazônia brasileira. Todo o procedimento para a obtenção do volume de madeira comercial foi baseado em técnicas de impacto reduzido derivadas do manejo florestal sustentável. Os autores verificaram que o fuste comercial – composto pela tora apta aos processos industriais – obteve um volume de 19.25 m³ ha⁻¹ sob um ciclo de corte de 35 anos, o

volume de biomassa total acima do solo utilizado foi de 330,5 m³ ha⁻¹. Presumindo que 330,5 m³ ha corresponda ao volume total do local de estudo, pôde-se deduzir que o fuste comercial representou 5,82% (19,25 m³ ha⁻¹). Sendo assim, utilizou-se este mesmo valor para encontrar o percentual de madeira comercial na presente pesquisa.

Com os dados de biomassa total e biomassa sob manejo florestal sustentável já conhecidos. Calculou-se o potencial energético com base nos resíduos gerados durante o processo de beneficiamento da madeira. A Equação 4.8, evidencia o potencial de energia requerido por uma termelétrica de base florestal que leva em conta um sistema convencional de turbina a vapor (ciclo Rankine) com rendimento de 30% (médio porte). Todas as informações obtidas para conversão foram obtidas do Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO (2009).

$$\text{Potencial (MW/ano)} = \frac{[(mg * 0.5) * 2000 \text{ kcal kg}^{-1} * 0.30]}{(860 * 8.322)} \quad (4.8)$$

Para a geração de resíduos, utilizou-se apenas o resultante de seu processamento, correspondendo a 50% do volume total da madeira em tora (CENBIO, 2009). O Poder Calorífico Inferior (PCI) utilizado foi de 2.000 kcal kg⁻¹ e o fator de conversão de kcal kg⁻¹ para kWh kg⁻¹ foi realizada pela divisão por 860 (COELHO; PALETTA; FREITAS, 2000). Considera-se que o sistema opere o ano todo com os resíduos gerados e que a operação ocorra em 95% das horas anuais, o que resulta em 8.322 horas de operação/ano.

- **Configuração do modelo de alocação de termelétricas e acesso a biomassa**

Após a espacialização dos pontos passíveis de instalação das termelétricas e do potencial de biomassa, configurou-se o modelo final de alocação. Para isso, relacionou-se cada ponto de demanda (termelétricas) a todos os pontos de oferta (biomassa), resultando em uma rede. Por meio da ferramenta *Spider Diagram*, utilizou-se essa rede como input para gerar um arquivo possível de utilizar a ferramenta *Network dataset*.

Posteriormente, utilizando a ferramenta *Network Analyst*, configurou-se o modelo de locação-alocação. O modelo aplicado foi Maximize Coverage com restrições de distância. Elaborou-se dois cenários, o primeiro, consistiu em alocar 5 termelétricas por estado com restrição de distância de 50 km e 100 km, com exceção do Amazonas e Pará, nesses casos,

foram selecionadas 5 termelétricas em cada mesorregião. O segundo, seguiu as mesmas configurações do primeiro, mudando apenas os pontos de demanda (termelétricas) que seriam as áreas urbanas.

Para calcular a potência total que os pontos de biomassa gerariam para cada usina, realizou-se a soma desses pontos. Considerou-se que cada termelétrica trabalharia com uma potência de 10 MW/ano – potência média observada nas termelétricas ativas na Amazônia, de acordo com o banco de dados da ANEEL (ANEEL, 2023).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Amazônia possuía, até 2022, 474 usinas termelétricas. Das quais, 430 trabalham com fontes fósseis, principalmente o óleo diesel (392), gás natural (21) e óleo combustível (17). Tais empreendimentos somaram um potencial instalado de 5.964 MW. Desse total, apenas 38 usinas empregam algum tipo de biomassa no seu funcionamento, os resíduos florestais destacam-se das demais, com 17 empreendimentos, localizados apenas no Pará, Amazonas, Acre, Roraima e Rondônia. O bagaço da cana de açúcar e óleos vegetais vieram em seguida, com 6 e 5 usinas, respectivamente. As usinas de biomassa, têm um potencial de apenas 586,5 MW, menos de 10% do total em operação (ANEEL, 2023).

O fornecimento elétrico no Brasil é realizado pelo Sistema Interligado Nacional e pelos Sistemas Isolados. O primeiro, representa 99,4%, sendo um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas. Enquanto nos Sistemas Isolados respondem por 0,6% e predomina a utilização de fontes fósseis, como o óleo Diesel e Combustível (ONS, 2022; ONS, 2023). Em 2022, a demanda energética dos 165 sistemas isolados foi de, em média, 442 MW e o óleo diesel é responsável por 65% do fornecimento, enquanto a biomassa representa apenas 8%.

Desse modo, observa-se a necessidade da criação de mais usinas termelétricas à base de biomassa florestal – resíduos do processamento da madeira. Pois proporcionaria maior segurança, sustentabilidade e desenvolvimento para a região Amazônica. A presente pesquisa, seguindo o objetivo 7 da Agenda 2030 da ONU que incentiva o uso de energias limpas de fácil acesso, analisou a localização ótima para instalação de termelétricas de base florestal no bioma Amazônia.

- **Análise dos modelos de krigagem para a obtenção do volume de biomassa total acima do solo**

Por meio das análises, constatou-se que o modelo que apresentou os melhores resultados foi o da Cokrigagem com as variáveis de vegetação classificada por fitofisionomia e precipitação. Neste modelo, os valores de REQM, EQM, %EF foram menores, enquanto que para os coeficientes R_a^2 , r, e c foram maiores, exceto o coeficiente d onde não foi observado um valor superior. Observou-se que os valores médios estimados não foram diferentes da média dos pontos extraídos através do banco de dados, apresentando 95% de confiança (Teste t). Utilizou-se para a precipitação a média anual entre 2002 e 2015 e para vegetação, empregou-se o mapa fornecido pelo IBGE com dados para 2017. Na Tabela 4.2, observa-se a distribuição dos valores encontrados na realização dos testes de krigagem para a verificação do melhor modelo de interpolação. A partir da cokrigagem, obteve-se um mapa de superfície de biomassa ($Mg\ ha^{-1}$) contínua dos valores estimados a partir dos dados amostrais. Este mapa, foi transformado para o formato raster com $1\ km^2$ de resolução.

Tabela 4.2. Distribuição dos dados referentes a validação cruzada (acuracidade) e estudo do melhor modelo de interpolação para estimativa da média da biomassa florestal acima do solo ($Mg\ ha^{-1}$) no bioma Amazônia. Foi analisado a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), EQM = Erro Quadrado Médio, %EF = Percentual de Eficiência, R^2_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado, r = Coeficiente de correlação, d = Índice de concordância e c = Índice de confiança.

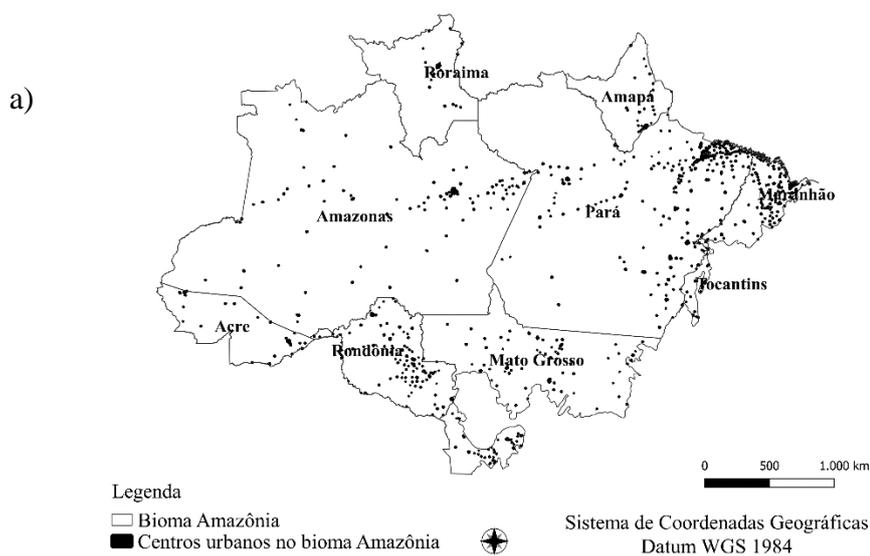
Interpoladores	REQM	EQM	%EF	R^2_{aj}	r	d	c	p-valor regressão	p-valor teste t	Biomassa Media
Subamostras										294,68
Krig Ord	45,96	2112,28	53,14	0,47	0,69	0,62	0,43	<0,0001	0,70	292,74
Cokrig-Veg	46,68	2178,57	54,80	0,51	0,71	0,55	0,38	<0,0001	0,77	293,36
Cokrig-Veg-Prec	45,05	2029,81	51,06	0,55	0,74 0	0,59	0,47	<0,0001	0,35	290,24
Cokrig- Prec	45,05	2384,22	59,98	0,47	0,68	0,49	0,39	<0,0001	0,71	292,99

Considera-se que: Krig Ord= Krigagem Ordinária, Cokrig-Veg= CoKrigagem com Vegetação, Cokrig-Veg-Prec= CoKrigagem com Vegetação e Precipitação, Cokrig-Veg-Prec-Temp= CoKrigagem com Vegetação, Precipitação e Temperatura, Cokrig-Prec= CoKrigagem com Precipitação. Para a Krig-Ord, modelou-se o semivariograma a partir de uma única variável de pontos amostrais (biomassa total) como entrada.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

- **Locais aptos para a instalação de termelétricas florestais**

Quando se realiza uma análise de localização-alocação, nem todas as regiões podem ser consideradas. Desse modo, primeiramente, retira-se as áreas impróprias e por conseguinte, inicia-se o processamento de dados nas áreas potenciais. Isso permite a otimização do tempo de processamento e evita erros nos resultados (DONG, 2008; RAMOS, 2000; SULTANA e KUMAR, 2012). Nas Figuras 4.3 (a) e (b), expõe-se os pontos candidatos correspondentes aos centros urbanos e a área potencial para instalação de termelétricas florestais, respectivamente, após a exclusão das áreas impróprias. Na Figura 4.3 (c), vê-se os pontos de biomassa gerados no bioma Amazônia, dentro do buffer de 50km.



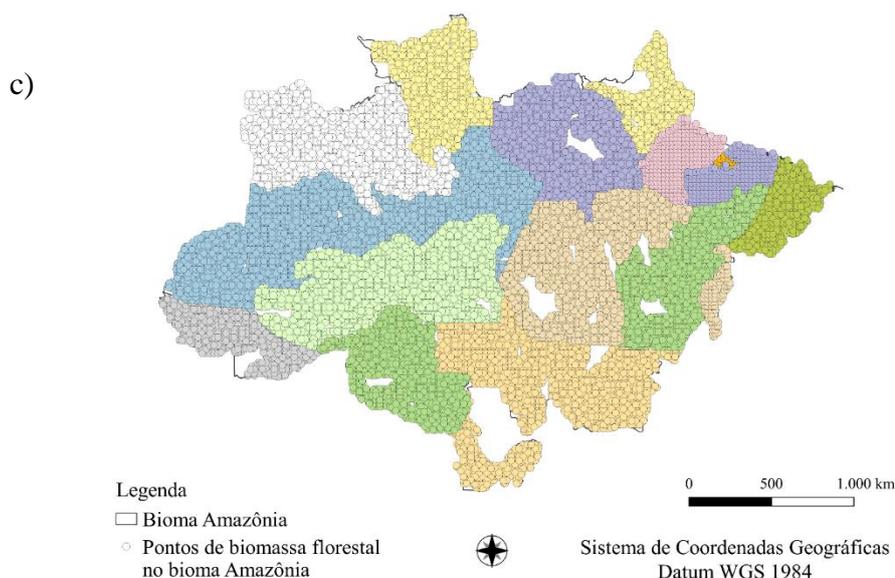


Figura 4.3. a) Pontos correspondentes aos centros urbanos no bioma Amazônia, sendo esses, todos candidatos à instalação de termelétricas florestais. b) Distribuição das localizações potenciais para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia. c) Pontos de biomassa dispostos dentro do buffer, considerando a distância de até 50 Km das hidrografias, estradas e linhas de transmissão, os pontos foram situados a 20 Km um do outro.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Tabela 4.3, vê-se a distribuição da quantidade de pontos de biomassa que cada estado conseguiu comportar, assim como o número de termelétricas, considerando as áreas potenciais e as áreas urbanas. Como já era esperado, os estados com as maiores áreas, Amazonas, Pará e Mato Grosso, obtiveram os melhores resultados. Rondônia e Roraima, também demonstraram ter um grande volume de biomassa total. Em relação a quantidade de usinas dispostas nas áreas potenciais, os maiores estados também comportariam um maior número desses empreendimentos. Quando foi considerado as áreas urbanas – municípios – o Pará e o Maranhão, abarcariam o maior volume de usinas termelétricas. Nesse sentido, a bioenergia deveria ter um espaço maior em estados como o Pará, pois apresenta uma grande área disponível, assim como biomassa, tanto potencial quanto em relação as áreas urbanas. Por ser o estado mais populoso da Amazônia, dispõe de mão de obra e polos consumidores, além disso, é uma das regiões que mais precisa de complementação de energia em áreas distantes (IBGE, 2022).

Tabela 4.3. Distribuição dos pontos de biomassa na Amazônia, da quantidade de usinas termelétricas à base de resíduos derivados do processamento da madeira comercial, considerando as áreas potenciais disponíveis e apenas os centros urbanos.

Amazônia Ocidental			
	Quant. Pontos de biomassa	Quant. UTE áreas potenciais	Quant. UTE áreas urbanas
Acre	431	203	22
Roraima	584	152	15
Rondônia	644	270	52
Amazonas	2.245	1.416	62
Amazônia Oriental			
	Quant. Pontos de biomassa	Quant. UTE áreas potenciais	Quant. UTE áreas urbanas
Maranhão	340	138	96
Tocantins	88	43	19
Mato Grosso	1272	464	75
Amapá	355	70	16
Pará	3.248	1.069	144

Fonte: Elaborador pelo autor (2023).

A Figura 4.4, mostra a distribuição das 5 usinas selecionadas no bioma Amazônia. Primeiramente, quanto ao potencial com base na geração energética da biomassa, considerando todas as áreas potenciais resultantes e as distâncias de 50 e 100 Km para o transporte da matéria-prima (Figuras a e b). Por conseguinte, vê-se as termelétricas selecionadas que abrangeram apenas os centros urbanos e os pontos de biomassa próximos (50 e 100 Km) (Figuras c e d).

Analisando a distância de 50 km para as áreas potenciais, observou-se que na maioria dos estados, as termelétricas se situariam nas proximidades de estradas. No entanto, no Pará, Mato Grosso e Amazonas, tais indústrias ficariam mais próximas aos rios. Já na distância de 100 Km, os empreendimentos foram situados, principalmente, nas proximidades dos corpos hídricos. Tais indústrias se movimentaram de acordo com a necessidade de abarcar mais pontos de biomassa ao seu entorno e assim, gerar mais energia. Tal afirmação, também se aplica as usinas que se realocaram em diferentes centros urbanos quando analisadas sob diferentes distâncias. Ressalta-se que o programa estabeleceu uma média de pontos que deveriam ser

abrangidos por cada usina, para a distância de 50 km foi de 23 pontos de biomassa. Para 100 km, cada termelétrica estava conectada a cerca de 74 pontos de biomassa.

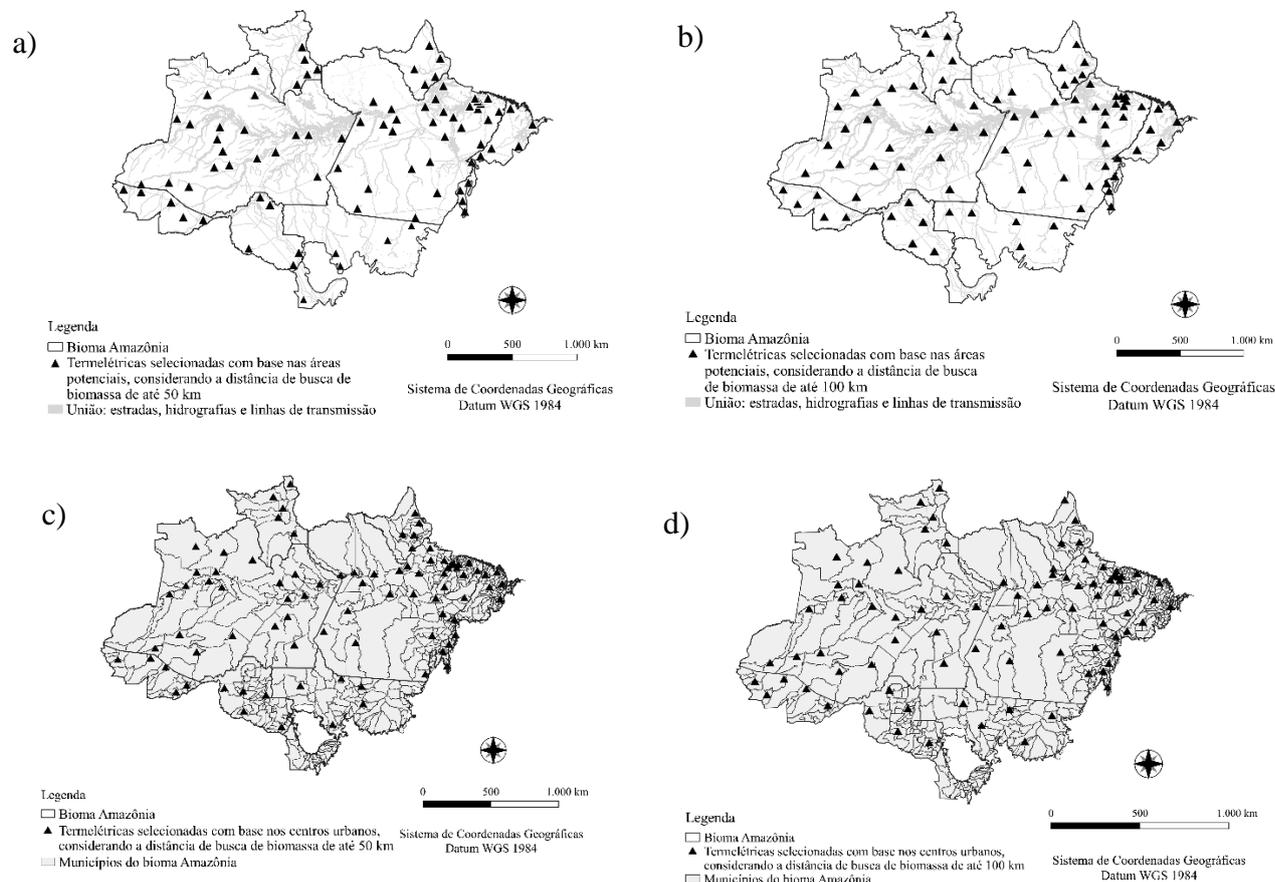


Figura 4.4. a) e b) Localização ótima das 5 termelétricas selecionadas no bioma Amazônia com base nas áreas potenciais, considerando a distância de busca de biomassa de 50 km e 100 km, respectivamente. c) e d) Localização ótima das 5 termelétricas selecionadas no bioma Amazônia com base nas áreas urbanas, considerando a distância de busca de biomassa de 50 Km e 100 Km, respectivamente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A Tabela 4.4, evidencia os resultados da Amazônia Ocidental, abrangendo a geração elétrica anual das 5 usinas selecionadas. O estado que apresentou o maior potencial foi Roraima, todos os valores para a distância de 50 km ficaram acima de 400 MW/ano e a grande maioria dos dados para a distância de 100 km ultrapassaram 2000 MW/ano.

Evidenciando o grande potencial dessa região para a produção de bioenergia. Quanto ao período de atuação das usinas, para as de 50 km, a maioria trabalharia por mais de 42 anos, e para a distância de 100 km, a maior parte ficaria ativa por mais de 200 anos.

Tabela 4.4. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais na Amazônia Ocidental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Amazônia Ocidental (Com exceção do Amazonas)												
	Acre				Roraima				Rondônia			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
UTE	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	439,8	1.368	44,0	136,8	426,8	487,1	42,6	48,7	377,7	614,9	37,7	61,4
2	375,7	1.120	37,6	112,0	715,8	2.184	71,5	218,4	407,1	1106,8	40,7	110,6
3	358,0	808,5	35,8	80,9	738,4	2.512	73,8	251,2	301,8	711,9	30,1	71,1
4	162,1	970,8	16,2	97,1	652,2	2.310	65,2	231,0	282,3	1239,2	28,2	123,9
5	441,3	1.376	44,1	137,6	659,6	2.753	65,9	275,3	113,1	816,9	11,3	81,6
Média	355,4	1.129	35,5	112,9	638,6	2.049	63,8	204,9	296,4	897,9	29,6	89,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Tabela 4.5, vê-se os resultados obtidos para a Amazônia Ocidental, abrangendo a geração elétrica das 5 usinas localizadas nos centros urbanos. Para esta restrição, Roraima também apresentou os melhores resultados, no entanto, tais dados foram menores quando comparadas aos obtidos pelas termelétricas localizadas nas áreas potenciais. Uma parcela dos valores para a distância de 50 km ficou acima de 400 MW/ano. Nos casos de 100 km, a grande maioria dos pontos obteve dados maiores que 1000 MW/ano. Quanto ao tempo de operação, para a primeira

distância considerada, a maioria das usinas teriam um tempo de trabalho superior a 30 anos, já para a segunda, os anos subiram para mais de 100.

Tabela 4.5. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas na Amazônia Ocidental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Amazônia Ocidental (Com exceção do Amazonas)												
	Acre				Roraima				Rondônia			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
UTE	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	358,8	1.160	35,8	116,0	267,0	1.050	26,7	105,1	231,0	849,2	23,1	84,9
2	354,4	1.050	35,4	105,0	723,5	166,1	72,3	16,6	131,4	692,9	13,1	69,2
3	214,5	774,5	21,4	77,4	64,8	2.304	6,4	230,4	98,3	969,8	9,8	96,9
4	315,9	1.162	31,5	116,2	732,5	2.317	73,2	231,7	268,3	1.153	26,8	115,3
5	409,4	1.052	40,9	105,2	379,0	1.492	37,9	149,2	296,3	839,7	29,6	83,9
Média	330,6	1.040	33,0	104,0	433,4	1.466	43,3	146,6	205,0	900,9	20,5	90,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

- **Roraima**

A média de geração de energia, para a distância de 50 Km, considerando as áreas potenciais, foi de 638,6 MW/ano, quanto ao período de operação, foi de 63,8 anos. A média de energia, para a distância de busca de 100 Km, foi de 2049 MW/ano, o período de operação seria de

204,9 anos.

Os municípios que apresentaram os maiores potenciais de geração de energia para a distância de 50 km, foram: Bonfim, Caracaraí, Caroebe, São João da Baliza e Rorainópolis. Para a distância de 100 Km, foram: Amajari, Iracema, Boa Vista, Caracaraí e Rorainópolis (IBGE, 2022).

Considerando os centros urbanos, a média de geração de energia, para a distância de 50 km foi de 433,4 MW/ano e o tempo de funcionamento obtido foi de 43,3 anos. Ressalta-se que os Centros Urbanos gerariam mais de 200 MW/ano a menos do que as áreas potenciais, por isso, também trabalhariam 20 anos a menos. A média de geração de energia, para a distância de 100 km foi de 1.466 MW/ano, mais de 500 MW/ano a menos do que nas áreas potenciais, quanto ao tempo de trabalho, foi de 146,6 anos.

As localizações potenciais foram: Uiramutã, Amajari, Iracema, Boa Vista e São João da Baliza. Considerando os 100 km, constatou-se os seguintes municípios: Uiramutã, Amajari, Cantá, Caracaraí e Caroebe. Observa-se que alguns municípios continuam como localidades potenciais, independente da distância e das restrições de centros urbanos e áreas potenciais, demonstrando-se como áreas com ótimos volumes de biomassa para abastecimento das usinas.

Roraima, em 2022, possuía, 144 usinas termelétricas em operação, desse total, apenas 5 operavam a base de resíduos florestais. Esses empreendimentos, possuem uma potência instalada de 44,8 MW. Desse modo, abrangendo as áreas potenciais e a distância de 50km, observou-se que o estado de Roraima está deixando de gerar 14 vezes mais energia do que poderia. Para a distância de 100 km, poderia ser produzido cerca de 47 vezes mais do que é produzido atualmente (ANEEL, 2023). Ao analisar as usinas situadas nos centros urbanos, constatou-se que para o percurso de até 50 km, este estado poderia aproveitar até 10 vezes o potencial instalado em 2022. Para a distância de 100 km, Roraima gerou 33 vezes menos energia do que poderia produzir.

Roraima não está entre os maiores estados da Amazônia, nem entre os que mais consomem energia, em 2022, a demanda foi de, em média, 95.970 MWh (EPE, 2023). A sua área é de 223.644.530 km² e tem uma população estimada em 652.713 pessoas (IBGE, 2022). A geração de energia elétrica com base nos resíduos da madeira seria proveniente de áreas sob manejo florestal sustentável. Desse modo, promoveria a utilização da mão-de-obra local, geraria empregos, desenvolvimento para a região e diversificaria a matriz energética local. Tais ações, são de extrema importância para essa região, visto que Roraima é o único

estado do Brasil cujo a capital não está ligada eletricamente ao resto do país, pertencendo, portanto, aos sistemas isolados. Em 2022, os 29 sistemas isolados da região demandaram, em média, 147,7 MW. Desse total, 16 empreendimentos só receberam energia elétrica entre 8 e 13h/dia, (ONS, 2022).

O potencial de Roraima para ser melhor aproveitado, deve levar em consideração melhorias nas vias de escoamento para manter o projeto economicamente viável. Esta região, não apresenta muitos pontos de conexão, existe apenas uma única rodovia que interliga o estado ao restante do país, a BR-174 (OLIVEIRA, 2007). Além disso, a capital, Boa Vista, apresenta mais de 60% da população estadual, evidenciando uma concentração de mão de obra e consumo de energia (OLIVEIRA, 2007). As usinas situadas ao norte do estado, podem contar com rodovias estaduais como a RR – 171 e RR – 407. A parte Centro-Sul do estado, é atendida pela BR – 174, além de rodovias estaduais e pelo Rio Branco (BRASIL, 2000). Roraima está entre os estados com menos quilometragem de estrada da Amazônia, demonstrando que melhorias na infraestrutura precisam ser consideradas para o transporte eficiente de biomassa (IMAZON, 2022).

- **Acre**

O estado do Acre veio em seguida com os melhores resultados, as 5 usinas gerariam, em média 344,4 MW/ano e funcionariam, por cerca de 35,5 anos, para a distância de 50 km. Na distância de 100 km, observou-se que a média de geração foi de 1.129 MW/ano e 112,9 anos de atividade. Para a distância de 50 km, as indústrias selecionadas ficaram nos municípios de Rodrigues Alves, Mâncio Lima, Tarauacá, Feijó, Sena Madureira e Senador Guiomard. Para a busca de 100 Km, as usinas estariam situadas em: Cruzeiro do Sul, Jordão, Feijó, Rio Branco e Sena Madureira.

Analisando as áreas urbanas no Acre, a média para a distância de 50 km foi de 330,6 MW/ano e 33 anos de funcionamento. Considerando 100 km, as 5 usinas, produziram, em média, 1.040 MW/ano e sua operação seria de 104 anos. As localidades com os melhores potenciais foram: Porto Walter, Feijó, Manoel Urbano, Xapuri e Senador Guiomard. Para a distância de 100 Km, foram: Porto Walter, Tarauacá, Jordão, Manoel Urbano e Rio Branco.

O Acre está situado em uma área de 164.173.429 km², sua população é de cerca de 906.876 pessoas. Além disso, é um dos estados que menos consomem energia na Amazônia, em 2022, a demanda média foi de 95.402 MWh (EPE, 2023; IBGE, 2021, 2022). Neste

mesmo ano, observou-se que de 29 indústrias termelétricas, 28 funcionam com óleo diesel e apenas 1 trabalha a base de resíduos florestais, produzindo cerca de 1,5 MW (ANEEL, 2023). Nos sistemas isolados, este estado conta com 7 empreendimentos, totalizando 27,7 MW/ano (ONS, 2022).

Considerando apenas o potencial utilizando em 2022 pela usina de resíduos florestais. Observou-se que o estado do Acre, para a distância de 50 km, poderia produzir mais de 230 vezes a mesma quantidade de energia, enquanto que para a distância de 100 km, essa localidade está deixando de produzir cerca de 750 vezes. Considerando as áreas urbanas, para a primeira distância, essa região, geraria cerca de 220 MW/ano a mais e para o percurso de 100 km, a geração energética poderia ser 690 vezes maior. Por isso, o aumento da utilização da bioenergia deve ser melhor analisando visando o bom potencial da região e o fraco aproveitamento deste recurso.

Em relação ao escoamento da matéria-prima, a infraestrutura do Acre ainda requer muitas melhorias para funcionar de forma eficiente e assim, permitir a fluidez eficaz de produtos. O sistema rodoviário se apresenta em más condições, principalmente no período chuvoso, o hidroviário, garante fluidez ao tráfego de cargas e passageiros. No entanto, a navegabilidade durante todo o ano só se verifica nos rios Juruá e Purus, a partir da divisa AC/AM. Atualmente, a rede rodoviária do estado do Acre, apresenta condições de operação deficientes. A malha possui uma distribuição espacial concentrada no leste, em torno da capital, basicamente composta por trechos federais (BRASIL, 2000).

A BR-364 é uma rodovia de fundamental importância pois, além de ser a mais extensa, é o único elo de ligação do estado às outras regiões do País. Interliga a capital Rio Branco a Porto Velho, em Rondônia e, a oeste, a Cruzeiro do Sul, passando por Sena Madureira e Tarauacá. A BR-317 é uma rodovia transversal à BR-364 e liga o estado do Acre ao estado do Amazonas. Estende-se ao sudeste do Estado e interliga Rio Branco, Xapuri, Brasiléia e Assis Brasil. A rede hidroviária apresenta um grande potencial no Estado, todavia, ainda é pouco aproveitada devido a falta de uma estrutura hidroportuária que ofereça facilidades necessárias à integração intermodal. Os principais rios navegáveis são: Purus, Acre, Iaco, Juruá, Tarauacá e Envira (BRASIL, 2000).

- **Rondônia**

Rondônia abarcou os menores dados na Amazônia Ocidental, a média para a

distância de 50 km foi de 296,4 MW/ano, quanto ao tempo de trabalho das usinas, seria de 29,6 anos. Para a distância de 100 Km, a média foi de 897,9 MW/ano e para o período de operação, foi de 89,7 anos. Nesse estado, as usinas selecionadas situavam-se nos seguintes municípios: Porto Velho, Cujubim, São Francisco do Guaporé, Colorado do Oeste e Vilhena. Para a distância de 100 Km, observou-se: Nova Mamoré, Cachoeiras do Jamari, Jaru, São Miguel do Guaraporã e Pimenteiras do Oeste.

Nas áreas urbanas, a média alcançada para a busca de 50 km foi de 205 MW/ano e o tempo de operação seria de 20 anos. Para a distância de 100 km, o valor médio observado foi de 900 MW/ano, no qual permitiria uma vida útil de 90 anos. Considerando os Centros Urbanos, as localidades destacadas foram: Nova Mamoré, Campo Novo de Rondônia, São Francisco do Guaporé, Cerejeiras e Ji-Paraná. Quando o Percurso de busca mudou para 100 km, as localidades que apresentaram os melhores potenciais baseado em biomassa foram: Chupinguaia, Seringueiras, Nova Mamoré, Theobroma e Candeias do Jamari.

Rondônia possui uma área estimada em 237.754.172 km², quanto a sua estimativa populacional, ela é de 1.815.278 pessoas (IBGE, 2022). O consumo energético desse estado em 2022 foi de, em média, 297.286 MWh (EPE, 2023). Esta localidade, conta com 46 usinas termelétricas, sendo que 41 trabalham empregando o óleo diesel para a produção de energia (ANEEL, 2023). Nesse estado, não se constatou usinas operantes a base de resíduos florestais, evidenciando a necessidade de incorporação dessa biomassa na matriz energética. Além disso, mesmo com 13 usinas ligadas aos sistemas isolados, elas não demandaram uma carga considerável de energia, produzindo apenas 2,0 MW (ONS, 2022).

Para o escoamento dos resíduos do processamento da madeira, o estado de Rondônia conta com uma malha viária composta por rodovias, hidrovias e o porto de Porto Velho. O subsistema rodoviário de Rondônia interliga, basicamente, Porto Velho às capitais do Acre e do Mato Grosso através da BR-364 e à capital do Amazonas através da BR-319. O subsistema hidroviário é constituído pelos rios Madeira, Mamoré e Guaporé. O rio Mamoré apresenta-se como mais uma opção de ligação internacional, pois é navegável desde Guajará-Mirim, na fronteira com a Bolívia, até Porto Grether (Bolívia), num estirão de 1.460 km. O porto de Porto Velho, está localizado a 2 km da cidade de Porto Velho, na margem direita do rio Madeira. Conta com acessos rodoviários pelas BRs 319, 364 e 425 e fluvial, pelo rio Madeira (BRASIL, 2000).

- **Amazonas**

A Tabela 4.6 traz os dados obtidos para as mesorregiões do Amazonas. Essa localidade, apresentou um dos melhores potenciais para a bioenergia. Todas as mesorregiões obtiveram números elevados, mas a de maior destaque, correspondeu a porção Norte, na distância de 50 km, todas as usinas produziram mais de 500 MW/ano e teriam uma vida útil de 55,9 anos. Para as usinas que englobaram todos os pontos de biomassa em até 100 km, a geração de energia ficou acima de 2000 MW/ano e o tempo de operação foi de 200 anos.

Tabela 4.6. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais nas mesorregiões do Amazonas, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Amazonas																
	Centro				Norte				Sudoeste				Sul			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
UTE	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	402,1	1.584	40,2	158,4	611,6	2.521	61,1	252,1	722,3	1.814	72,2	181,4	421,2	2.015	42,1	201,5
2	422,3	1.842	42,2	184,2	610,5	2.251	61	225,1	407,2	2.335	40,7	233,5	404,9	2.041	40,4	204,1
3	398,7	1.576	39,8	157,6	559,4	2.048	55,9	204,8	707,2	2.372	70,7	237,2	602,8	1.710	60,2	171
4	598,2	2.193	59,8	219,3	719,9	2.284	71,9	228,4	572,9	1.655	57,2	165,5	538,4	1.459	53,8	145,9
5	429,8	2.325	42,9	232,5	627,4	2.190	62,7	219	467,1	1.866	46,7	186,6	536,9	1.567	53,6	156,7
Média	450,2	1.904	45	190,4	625,7	2.259	62,5	225,9	575,3	2.008	57,5	200,8	500,8	1.758	50	175,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A média de geração de energia para a região norte, na distância de 50 km foi de 625,7 MW/ano, para o período ativo, foi 62,5 anos. Para as usinas de 100 km foi de 2.259 MW/ano, quanto ao período de trabalho, foi de 225,9 anos. A segunda mesorregião que abrangeu os melhores resultados foi o Sudoeste, a média de energia gerada, para 50 km de distância, foi de 575,3 MW/ano, enquanto o tempo de funcionamento seria de 57,5 anos. Abrangendo os 100 km, essa região obteria 2.008 MW/ano e operaria por cerca de 200,8 anos.

Em seguida, observou-se o Centro, onde a média de energia para a distância de 50 km foi de 450,2 MW/ano, funcionando por cerca de 45 anos. Para a distância de 100 km, foi de 1.904 MW/ano, o período de atividade seria de 190 anos. O Sul apresentou produziria com base na biomassa florestal, cerca de 500,8 MW/ano, tais usinas teriam 50 anos de vida útil. Considerando a distância de 100 km, a média para geração energética foi de 1.758 MW/ano, funcionando por 175,8 anos.

As usinas selecionadas no Amazonas, considerando todas as mesorregiões e a distância de 50 km estavam situadas nos municípios de: Barcelos, Santo Antônio do Içá, São Gabriel da Cachoeira, Japurá, Juruá, Tefé, Coari, Ipixuna, Envira, Pauini Tapauá, Nova Olinda do Norte, Apuí, Mauá, Manaquiri, Maraã e Autazes. Para a distância de 100 Km, observou-se as seguintes localidades: São Gabriel da Cachoeira, Barcelos, Santa Izabel do Rio Negro, Japurá, Maraã, Amaturá, Fonte Boa, São Paulo de Olivença, Ipixuna, Boca do Acre, Jutai, Canutama, Tapauá, Coari, Codajás, Manicoré, Apuí, São Sebastião do Uatumã, Mauá e Careiro.

Na Tabela 4.7 vê-se os resultados obtidos para as mesorregiões do estado do Amazonas, abrangendo a geração elétrica das 5 usinas localizadas nos centros urbanos. Todos os potenciais considerando a busca de até 50 km na região Norte apresentaram valores acima de 500 MW/ano, os anos de operação foram superiores a 50. Para a distância 100 km, todos os valores ficaram acima de 1000 MW/ano, quanto aos anos de trabalho, todos superaram 100 anos.

Nos centros urbanos, o Norte produziria, anualmente, cerca de 615,1 MW/ano, na distância de busca de 50 km, e suas usinas estariam ativas por 61,5 anos, em média. Para o percurso de 100 km, a energia gerada seria de 2.234 MW/ano, neste caso, as usinas funcionariam por um período de 223,4 anos. A segunda região com o melhor resultado correspondeu ao Centro. A média gerada para a distância de 50 km foi de 449,0 MW/ano, sendo 44,9 anos o tempo regular de operação. Para 100 km, 1.833 MW/ano foi a média

gerada para o potencial energético, possibilitando um período de trabalho de 183,3 anos.

A região sul veio em seguida, obtendo 472,3 MW/ano e 47,3 anos de atividade. Para 100 km, observou-se o aumento do potencial para 1.782 MW/ano e do tempo para 178,2 anos. Por fim, o Sudoeste compareceu com a menor média do Amazonas, sendo de 516,3 MW/ano, para 50 km e 51,6 anos. Para a busca de até 100 km, foi de 1.733 MW/ano, proporcionando às usinas uma vida útil de até 173,3 anos. As localidades selecionadas com a maior produção de energia foram: São Paulo de Olivença, Envira, Pauini, Itamarati, Canutama, Manicoré, Apuí, Novo Aripuanã, Uarini, Japurá, Fonte Boa, Maraã, Novo Airão, Presidente Figueiredo, São Sebastião do Uatumã, Careiro, Autazes e Itapiranga. Para a distância de 100 km, foram: São Gabriel da Cachoeira, Santa Isabel do Rio Negro, Barcelos, Japurá, Maraã, Jutai, Coari, São Paulo de Olivença, Tefé, Ipixuna, Eirunepé, Pauini, Itamarati, Lábrea, Tapauá, Apuí, Novo Aripuanã, Mauá, Rio Preto da Eva e Anamã.

Tabela 4.7. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas nas mesorregiões do Amazonas, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Amazonas																
	Centro				Norte				Sudoeste				Sul			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km												
UTE																
1	416,0	1.961	41,6	196,1	572,4	2.268	57,2	226,8	563,9	2.224	56,3	222,4	402,7	1.519	40,2	151,9
2	410,3	1.564	41,0	156,4	595,3	1.846	59,5	184,6	500,6	2.917	50,0	191,7	555,0	1.985	55,5	198,5
3	583,6	1.785	58,3	178,4	637,7	1.738	63,7	173,8	406,4	1.568	40,6	156,8	480,5	1.686	48,0	168,6
4	517,6	1.904	51,7	191,4	594,7	2.458	59,4	245,8	618,4	1.449	61,8	144,9	438,2	1.759	43,8	175,9
5	317,5	1.941	31,7	194,1	675,5	2.862	67,5	286,2	492,1	1.508	49,2	150,8	485,2	1.963	48,5	196,3
média	449,0	1.833	44,9	183,3	615,1	2.234	61,5	223,4	516,3	1.733	51,6	173,3	472,3	1.782	47,2	178,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O Amazonas é o maior estado do Brasil, possuindo uma área de 1.559.255.881 km², a sua população estimada é de 4.269.995 pessoas (IBGE, 2022). Evidencia-se uma grande discrepância entre a extensão do Amazonas, a quantidade da sua população e a demanda de energia elétrica que em 2022 foi de 560.124 MWh. Um fato interessante é que o estado do Pará consumiu o dobro (EPE, 2023). Este estado, no fim de 2022, contava com 117 empreendimentos termelétricos, dos quais 96 são abastecidos com óleo diesel e apenas 2 funcionam com resíduos florestais, totalizando 9 MW (ANEEL, 2023).

Relacionando os resultados obtidos pelas áreas potenciais e os dados de produção elétrica obtidos pelas usinas à base de resíduos florestais em 2022. Notou-se que o Amazonas poderia produzir mais de 60 vezes o que se tinha neste período. Para a distância de 100 km, o potencial perdido é de mais de 250 vezes.

Quanto aos valores gerados pelos centros urbanos, destaca-se que, na a distância de 50 km, este estado poderia ter mais 68 usinas de 10 MW/ano se aproveitasse os resíduos de madeira disponíveis. No percurso de 100 km, o potencial não aproveitado é de 248 vezes. Em relação aos sistemas isolados, o Amazonas conta com 95 unidades, demandando uma carga anual de 218,5 MW, esta demanda poderia ser facilmente suprida mesmo empregando apenas usinas com distância máxima de busca de até 50 km (ONS, 2022).

Devido as suas áreas continentais, o Amazonas apresenta problemas significativos, principalmente na área de transporte, face às grandes distâncias entre as cidades do interior e seu polo mais importante, a capital Manaus. O sistema de transportes do Estado é composto por uma extensa rede fluvial, por rodovias e pelos portos de Manaus e Itacoatiara. O porto de Manaus representa suporte indispensável ao comércio e à indústria da Zona Franca de Manaus. O porto de Itacoatiara permite o abastecimento interno do próprio Estado e a interconexão com os demais estados da federação e com os países limítrofes (BRASIL, 2000).

As cidades selecionadas com os maiores potenciais como Manaus, Itacoatiara, Tabatinga, Coari e Parintins, contam com portos que permitem o escoamento de produtos. Outras, permitem apenas a acostagem de embarcações, como Manicoré, no rio Madeira e Boca do Acre, no rio Purus (BRASIL, 2000). As principais rodovias do estado são as federais BR's 174, 210, 230, 307, 317, 319 e algumas estaduais, principalmente na região polarizada pela capital Manaus, tais como AM-010, 254, 352 e 363. A BR-174 desenvolve-se para o norte do Estado, ligando Manaus ao estado de Roraima (BRASIL, 2000), permitindo conexão com o estado que apresentou os maiores dados de biomassa.

A Tabela 4.8 evidencia a energia que poderia ser gerada, bem como, os anos de operação das cinco termelétricas dispostas em cada estado constituinte da Amazônia Oriental, com exceção do estado do Pará. O estado que obteve o melhor potencial energético foi o Amapá, todos os valores de geração de energia para a distância de 50 km superaram 490 MW/ano e a grande maioria dos dados para a distância de 100 km ultrapassaram 1.100 MW/ano. Abrangendo o período de trabalho das usinas de 50 km, a maioria trabalharia por mais de 42 anos e para a distância de 100 km, a maior parte teria uma vida útil de mais de 212 anos.

Tabela 4.8. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais na Amazônia Oriental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Amazônia Oriental (Com exceção do Pará)																
UTE	Maranhão				Mato Grosso				Tocantins				Amapá			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	213,5	669,4	21,3	66,9	298	852,8	29,8	85,2	28,6	55,1	2,8	5,5	555,6	705,5	55,5	70,5
2	380,2	950	38	95	71,7	737,8	7,1	73,7	25	29,1	2,5	2,9	495	1.605	49,5	160,5
3	157,1	827,1	15,7	82,7	178,4	534,9	17,8	53,4	87,9	74,5	8,7	7,4	527,4	1.965	52,7	196,5
4	239,3	729	23,9	72,9	160,9	1.520	16	152	69,7	73,5	6,9	7,3	422,1	1.123	42,2	112,3
5	222,7	1.229	22,2	122,9	257,4	1.194	25,7	119,4	25,7	26,4	2,5	2,6	515,5	1.240	51,5	124
Média	242,6	881	24,2	88,1	193,3	968,1	19,3	96,7	47,3	51,7	4,7	5,1	503,1	1.327	50,2	132,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Tabela 4.9 vê-se os resultados obtidos para a Amazônia Oriental, abrangendo a geração elétrica das 5 usinas localizadas nos centros urbanos, considerando a potência de 10 MW. Aqui, o Amapá também foi o estado que produziu os melhores resultados, na distância de 50 km

a maioria dos valores superaram 400 MW/ano, proporcionando um período de operação maior a 40 anos. Nos percursos de 100 km, a maioria dos valores superaram 1000 MW/ano, podendo funcionar por mais de 100 anos.

Tabela 4.9. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas na Amazônia Oriental, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Amazônia Oriental (Com exceção do Pará)																
UTE	Maranhão				Mato Grosso				Tocantins				Amapá			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	313,0	1.399	31,3	139,9	284,2	1.152	28,4	115,2	79,7	30,9	7,9	3,0	500,1	1.609	50,0	160,9
2	237,6	332,4	23,7	33,2	171,1	1.228	17,1	122,8	27,9	43,7	2,7	4,3	309,3	916,0	30,9	91,6
3	247,6	1.088	24,7	108,8	99,9	866,8	9,9	86,6	34,4	96,8	3,4	9,6	422,3	1.230	42,2	123,0
4	444,4	700,4	44,4	70,0	355,5	683,8	35,5	68,3	55,5	61,5	5,5	6,1	427,7	1.448	42,7	144,8
5	330,9	851,0	33,0	85,1	192,7	574,8	19,2	57,4	25,7	25,7	2,5	2,5	524,2	960,8	52,4	96,0
Média	314,7	874,3	31,4	87,4	220,7	901,1	22,0	90,1	44,6	51,7	4,4	5,1	436,7	1.233	43,6	123,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

- **Amapá**

A média de geração de energia para o Amapá, na distância de 50 km foi de 503,1 MW/ano, quanto ao período em atividade, foi de 50,2

anos. Para a distância de 100 km, a média de energia produzida pelas usinas seria de 1.327 MW/ano, funcionando por cerca de 132,7 anos. As localidades selecionadas foram: Calçoene, Amapá, Macapá, Pedra Branca do Amapari e Mazagão. Para o percurso de 100 Km, os municípios que apresentaram os maiores potenciais com base na disponibilidade de biomassa florestal foram: Pedra Branca do Amapari, Mazagão, Macapá e Santana.

Abrangendo os Centros urbanos e a distância de 50 km, as usinas gerariam 436,7 MW/ano, estes empreendimentos funcionariam, por 43,6 anos. No percurso de 100 km, a energia obtida foi de 1.233 MW/ano, sendo produzidos por cerca de 123,3 anos. As regiões destacadas foram Serra do Navio, Mazagão, Pracuuba, Calçoene e Ferreira Cuba. Quando se mudou a distância para 100 km, as localidades selecionadas foram: Oiapoque, Calçoene, Serra do Navio, Cutias e Laranjal do Jari.

O estado do Amapá situa-se de uma área de 142.470.762 km² e sua população é estimada em 877.613 pessoas (IBGE, 2022). Essa região, apresenta o menor consumo de energia elétrica do bioma Amazônia, em 2022, a média foi de 94.074 MWh (EPE, 2023). Neste mesmo ano, concentrou 6 indústrias termelétricas, não apresentando nenhuma cujo funcionamento fosse através de resíduos florestais (ANEEL, 2023). Ainda em 2022, este estado detinha apenas 1 empreendimento ligado aos Sistemas Isolados, com uma carga anual de 5,5 MW (ONS, 2022). É notável que nesta localidade, medidas acerca do melhor aproveitamento da biomassa precisam ser elaboradas e colocadas em prática. Pois, mesmo que detenha o maior potencial da Amazônia Oriental, nada está sendo aproveitado para bioenergia.

Em relação a infraestrutura para o transporte de matéria-prima, o Amapá é banhado por grandes rios, dos quais se destacam o Amazonas, Oiapoque, Jari e Araguari. O porto de Macapá está localizado a 18 km da capital, no rio Amazonas, em frente à ilha de Santana, com acesso rodoviário através da AP-010, que liga Macapá à Mazagão, e da BR-210, que se encontra com a BR-156 próximo a Macapá (BRASIL, 2000).

Os acessos marítimos, se dão através do rio Amazonas e seus afluentes. As principais rodovias federais são as BR's 156 e 210. A BR-156 corta o Estado do Amapá no sentido norte-sul. Ao Norte, esta rodovia atinge a cidade de Oiapoque, na fronteira com a Guiana Francesa. A BR-210 faz parte da Rodovia Perimetral Norte que foi planejada para ligar Macapá ao estado do Acre. A BR-210 corta o Amapá de leste a oeste e conta com 468 km de extensão (BRASIL, 2000). Percebe-se que vários municípios que são localidades potenciais são atendidos por vias de escoamento próximas.

- **Mato Grosso**

O segundo estado com o maior potencial foi o Mato Grosso, obteve uma média de energia de 193,3 MW/ano e um tempo de funcionamento de 19,3 anos. Para o percurso de até 100 km, foi de 968,1 MW/ano e o tempo de operação, foi de 96,7 anos. Nesse contexto, os municípios com a melhor localização para a implantação de termelétricas florestais foram: Santa Cruz do Xingu, Marcelândia, Ponte e Lacerda e Nova Maringá. Para a distância de 100 Km foram Aripuanã, Cotriguaçu, Santa Carmem, Santa Cruz do Xingu e Nova Guarita.

Considerando os centros urbanos, média obtida foi de 220 MW/ano, na qual as usinas teriam capacidade para operar durante mais ou menos, 20 anos. Abrangendo a busca de 100 km, a média foi de 901,1 MW/ano, o período foi de 90,1 anos. Na distância de 50km observou-se Peixoto de Azevedo, Cláudia, Nova Maringá, Aripuanã e Paranaíta. Para o percurso de até 100 km, as áreas potenciais foram: São José do Xingu, Nova Guarita, Nova Ubitatã, Novo Horizonte do Norte e Cotriguaçu.

O Mato Grosso apresenta uma área de 903.208.361 km² e uma população de 3.567.234 pessoas (IBGE, 2022). Em relação ao consumo de energia elétrica, é o segundo maior estado da Amazônia em demanda, em 2022 foram requeridos, em média 830.583 MWh (EPE, 2023). Neste mesmo ano, contou-se 77 empreendimentos termelétricos, 49 deles funcionando por meio do óleo diesel e apenas 10, abastecidos por resíduos florestais. Essas indústrias, possuem uma potência instalada de 133,9 MW, sendo o maior potencial a base de resíduos florestais observados na Amazônia (ANEEL, 2023).

Nos sistemas isolados, observou-se apenas uma única usina operando com óleo diesel, gerando 0,7 MW/ano (ONS, 2022). Mesmo com bons resultados, para a distância de 50 km, considerando as áreas potenciais e os centros urbanos, este estado ainda está deixando de produzir 1 vez o potencial atualmente utilizado nas usinas de resíduos florestais. Para 100km, o potencial não aproveitado é de 7 vezes.

Em relação a infraestrutura da região, a navegação se restringe basicamente aos rios Paraguai e Araguaia, que demonstram potencialidade para o transporte de mercadorias. O rio Paraguai apresenta-se como alternativa, em uma rota multimodal, para o escoamento das safras agrícolas do Mato Grosso, com destino aos centros exportadores, ou para abastecimento do próprio estado. Além disso, esse rio desempenha importante papel na integração do Brasil com a Argentina, o Uruguai e o Paraguai. O rio Araguaia apresenta, a longo prazo, elevada potencialidade de transporte de carga, notadamente grãos agrícolas, em

função da sua área de influência (BRASIL, 2000).

Com relação ao subsistema portuário, o porto de Cáceres é o único porto do Mato Grosso que apresenta instalações adequadas e encontra-se delegado ao Estado. No sistema rodoviário, a BR-070 liga Cáceres a Brasília, passando por Cuiabá e Barra do Garças. A BR-163 corta o Estado de Norte a Sul, desde a divisa PA/MT até a divisa MT/MS, passando por Sinop, Cuiabá e Rondonópolis. Esta rodovia é de grande importância para o desenvolvimento regional por atravessar região de alto potencial econômico (BRASIL, 2000). A BR-364 corta o sul do Estado desde a divisa GO/MT até a divisa MT/RO, passando por Rondonópolis e Cuiabá. Possui trechos coincidentes com as BRs-163, 070 e 174. Esta rodovia é o escoadouro natural da produção do Mato Grosso rumo a São Paulo para beneficiamento e exportação pelo porto de Santos (BRASIL, 2000).

- **Maranhão**

O Maranhão obteve resultados muito satisfatórios mesmo não estando situado completamente dentro do bioma Amazônia. Para a distância de 50 km, a média de geração de energia com base nos resíduos do processamento da madeira foi de 242,2 MW/ano, o tempo de operação seria de 24,2 anos. Na distância de 100 km, esta região obteve 881 MW/ano e 88,1 anos. Observou-se que as termelétricas estavam localizadas em Açailândia, Vitorino Freire, São Luiz, Candido Mendes. Para a distância de 100 Km, as regiões com os melhores resultados foram Turiaçu, São Luiz, Zé Doca, Altamira do Maranhão e Açailândia.

O Maranhão apresentou uma média superior nos centros urbanos para a distância de 50 km, sendo de 314,7 MW/ano, suas usinas funcionariam por cerca de 31,4 anos. Na busca de 100 km, a média saltou para 874,3 MW/ano, operando por 87,4 anos. Quando analisado os Centros Urbanos, os municípios selecionados foram: Maracaçumé, Araguaianã, Serrano do Maranhão, Bacurituba e Conceição do Lago Açu. Em relação a distância de 100 km, as localidades selecionadas foram: Turiaçu, Anajatuba, Nova Olinda do Maranhão, Buriticupu e Açailândia.

O estado do Maranhão, assim como o Tocantins, não apresenta termelétricas que utilizam resíduos florestais e não possui nenhuma indústria ligada aos sistemas isolados. Tais dados são interessantes, pois essa região, possui uma extensão de 329.651.496 km² e uma população de 7.153.262 pessoas (IBGE, 2022). Além disso, em 2022, demandou um alto consumo médio de energia elétrica que foi de 828.315 MWh, sendo o terceiro maior estado

consumidor da Amazônia, ficando atrás apenas do Pará e Mato Grosso (EPE, 2023).

Em relação a infraestrutura, o seu sistema rodoviário desempenha papel de grande importância no apoio às atividades econômicas. Quanto ao transporte ferroviário, a Estrada de Ferro Carajás corta o Estado, ligando a Serra de Carajás, no estado do Pará, ao porto de Ponta da Madeira, em São Luís. O estado do Maranhão conta com dois importantes portos marítimos, Itaqui e Ponta da Madeira. Em relação às hidrovias, os rios do Maranhão pertencem à bacia do Nordeste, formada principalmente por três grandes rios: o Mearim, o Pindaré e o Grajaú. Não existem portos organizados ao longo dos rios e o transporte é incipiente, sendo realizado por pequenas embarcações que servem, principalmente, às populações ribeirinhas no transporte de sua produção, alguns insumos básicos e passageiros (BRASIL, 2000).

As principais rodovias federais são as BRs 010, 135, 222, 226, 230 e 316. A BR-010, Belém - Brasília, liga o Maranhão ao Sul do país. A BR-135 liga São Luís ao sul do Piauí. A BR-222, atravessa o Estado ligando Açailândia ao nordeste do Maranhão. A BR-226 também corta o Estado de Porto Franco, divisa com o estado de Tocantins até Timon, na divisa com o Piauí. A BR-230 atravessa o sul do Estado e a BR-316 corta o Maranhão de leste a oeste, desde Timon (divisa MA/PI) até a divisa MA/PA. (BRASIL, 2000). Desse modo, ao analisar a introdução da bioenergia nessa localidade, os pontos de escoamento devem ser estudados para que a viabilidade do projeto seja satisfatória.

- **Tocantins**

Por fim, o Tocantins apresentou os menores valores, mas que podem ser satisfatórios para algumas regiões. A média para distância de 50 km, foi de 47,3 MW/ano e o período de atividade seria de 4,7 anos, já para a distância de 100 km, foi de 51,7 MW/ano, o tempo, foi de 5,1 anos de operação. No Tocantins, as usinas estavam dispostas nos municípios de Guaraí, Bernardo Saião, Araguacema, Araguanã e Araguatins. Abrangendo a distância de 100 Km, as localidades escolhidas foram: Guaraí, Arapoema, Santa Fátima do Araguaia, Xambioá e Araguatins.

O potencial médio obtido para as áreas urbanas e distância de 50 km, foi de 44,6 MW/ano. O tempo de funcionamento, foi de 4,4 anos. Abrangendo a busca de 100 km, 51,7 MW/ano foi a média gerada, para o período de atividade dos empreendimentos, foi de 5,1 anos. As localidades selecionadas no Tocantins foram Colmeia, Arapoema, Muricilândia,

Buriti do Tocantins e Riachinho. Para a distância de 100 km, as melhores localizações foram Colmeia, Arapoema, Santa Fátima do Araguaia, Buriti do Tocantins e Riachinho.

O Tocantins não possui localidades pertencentes aos sistemas isolados, assim como termelétricas que funcione a base de resíduos florestais (ANEEL, 2023). O menor estado da Amazônia, possui uma extensão de 277.423.627 km² e uma população estimada em 1.607.363 pessoas. Um fato interessante é que esse estado, mesmo sendo o menor da Amazônia em extensão, apresenta um consumo de energia elétrica maior que de estados maiores, como Acre, Roraima e Amapá. Em 2022, a demanda média foi de 222.033 MWh (EPE, 2023).

A malha rodoviária do Estado ainda é insuficiente em relação à sua extensão territorial. A rodovia BR-153, que é a parte da Belém - Brasília, corre à margem esquerda do rio Tocantins e corta o Estado de norte a sul, sendo extremamente importante para toda a rede rodoviária. A rodovia BR-235 beneficia diretamente o sul do Pará e o norte de Mato Grosso, passando pela região central do Tocantins, de grande potencial agrícola. A utilização da modalidade hidroviária para o escoamento dos produtos agrícolas locais para a exportação é essencial para o Tocantins (BRASIL, 2000).

- **Pará**

As Tabelas 4.10 e 4.11 evidenciam os dados obtidos pelas mesorregiões do Pará baseado nas áreas potenciais para instalação de termelétricas florestais. O Baixo Amazonas abrangeu os melhores resultando, onde a grande maioria dos dados de energia, para a distância de 50 km ficaram acima 560 MW/ano, além disso, trabalhariam por mais de 30 anos. Para a distância de 100 km, todos os valores de geração de energia superaram 1.500 MW/ano e operariam por mais de 150 anos.

Tabela 4.10. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Pará												
UTE	Baixo Amazonas				Marajó				Metropolitana Belém			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	331,9	2.316	33,1	231,6	483,5	1.132	48,3	113,2	70,8	70,8	7,0	7,0
2	624,6	1.879	62,4	187,9	439,2	1.121	43,9	112,1	34,7	34,7	3,4	3,4
3	562,4	2.052	56,2	205,2	586,3	1.393	58,6	139,3	65,9	65,9	6,5	6,5
4	568,5	1.508	56,8	150,8	549,6	310,8	54,9	31,0	55,2	55,2	5,5	5,5
5	614,2	1.505	61,4	150,5	395,6	1.229	39,5	122,9	87	87	8,7	8,7
Média	540,3	1.852	54,0	185,2	490,8	1.037	49	103,7	62,7	62,7	6,2	6,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 4.11. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas potenciais situadas nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Pará												
UTE	Nordeste				Sudeste				Sudoeste			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 Km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km
1	414,5	1.195	41,4	119,5	178,1	366,1	17,8	36,6	235,2	1.814	23,5	181,4
2	406,6	748,8	40,6	74,8	281,5	969,4	28,1	96,9	350,7	2.100	35,0	210,0
3	301,2	564,9	30,1	56,4	288,2	441,7	28,8	44,1	532,5	1.478	53,2	147,8
4	475,8	1.142	47,5	114,2	257,5	443,4	25,7	44,3	302,4	1.199	30,2	119,9

5	463,1	906,6	46,3	90,6	120,4	1.029	12,0	102,9	395,6	1.528	39,5	152,8
Média	412,2	911	41,2	91,1	225,1	649,9	22,5	65	363,2	1.624	36,3	162,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A média de geração de energia, para a distância de 50 km foi de 540,3 MW/anos e o período médio de trabalho, de 54 anos. Englobando a distância de 100 km, as usinas dessa região produziram até 1.852 MW/ano, quanto ao tempo médio de atividade das usinas, seria de 185,2 anos. A segunda localidade com o maior potencial foi o Sudoeste Paraense, para a distância de 50 Km, a energia gerada seria de 225,1 MW/ano e o tempo de atividade seria de 22,5 anos. Na distância de 100 km, observou-se que a média foi de 649,9 MW/ano e os empreendimentos funcionariam por 65 anos.

Em seguida, observou-se o Nordeste, para a geração de energia anual e distância de 50 km, obteve-se 412,1 MW/ano, sendo que tais usinas trabalhariam, em média por 41,2 anos. No percurso de 100 km, a energia foi de 911 MW/ano, operando por cerca de 91,1 anos. O potencial energético para o Marajó, observado na distância de 50 km, correspondeu a 490,8 MW/ano, onde as usinas trabalhariam cerca de 49 anos. Para o percurso de 100 km, a geração de energia seria 1037 MW/ano, o tempo de funcionamento seria de 103,7 anos.

Posteriormente, observou-se o Sudeste, essa mesorregião, considerando a distância de 50 km, obteve 225,1 MW/ano, em relação à média de tempo de operação, foi de 22,5 anos. Para a distância de 100 Km, a média de energia gerada pelas usinas foi de 649,9 MW/ano, elas operariam por 65 anos. Ao final, observou-se a região Metropolitana de Belém. As médias de geração de energia e de tempo de funcionamento foram as mesmas para as duas distâncias, sendo de 62,7 MW/ano e 6,2 anos.

As regiões selecionadas abarcando todas as mesorregiões foram Alenquer, Monte Alegre, Prainha, Mojuí dos Campos, Uruará, Juruti, Jacareacanga, Novo Progresso, São Félix do Xingu, Bannach, Afuá, Gurupá, Breves, Portel, Pacajá, Bagre, Cametá, Moju, Dom Eliseu, Capitão Poço, Viseu, Barcarena, Bujaru, Santo Antônio do Tauá, Castanhal, Inhagapí e Nova Timboteua. Na distância de 100 Km, observou-se: Oriximiná, Óbidos, Santarém, Monte Alegre, Almeirim, Uruará, Trairão, Altamira, Novo Progresso, São Félix do Xingu, Santana do Araguaia,

Rio Maria, Eldorado dos Carajás, Gurupá, Afuá, Senador José Portinho, Portel, Curralinho, Cametá, Moju, Goianésia do Pará, Santo Antônio do Tauá, Cachoeira do Arari, Viseu, Castanhal, Terra Alta.

As Tabelas 4.12 e 4.13, mostram os resultados obtidos pelas mesorregiões do Pará baseado nas áreas urbanas. Diferentemente dos dados obtidos acima, ao considerar as áreas urbanas, o Sudoeste alcançou os melhores dados. A maior parte dos potenciais gerados ficaram acima de 300 MW/ano, os períodos de atividade superaram 30 anos. Na de 100 km, todas as usinas gerariam mais do que 1000 MW/ano e trabalhariam por mais de 100 anos.

Tabela 4.12. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo – em anos – de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Pará												
UTE	Baixo Amazonas				Marajó				Metropolitana Belém			
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)	
	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 m	100 km
1	409,9	1.561	40,9	156,1	531,7	1.209	53,1	120,9	40,6	40,6	4,0	4,0
2	294,6	1.726	29,4	172,6	459,6	1.263	45,9	126,3	25,2	25,2	2,5	2,5
3	312,8	1.431	31,2	143,1	209,7	639,0	20,9	63,9	70,8	70,8	7,0	7,0
4	332,7	1.810	33,2	181,0	361,5	732,0	36,1	73,2	94,6	94,6	9,4	9,4
5	358,5	644,7	35,8	64,4	561,1	1.086	56,1	108,6	82,4	82,4	8,2	8,2
Média	341,7	1.434	34,1	143,4	424,7	986,2	42,4	98,6	62,7	62,7	6,2	6,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 4.13. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas– anos – situadas nas mesorregiões do Pará, considerando a potência de 10 MW e as distâncias de busca de biomassa de 50 e 100 km.

Mesorregiões - Pará													
UTE	Nordeste				Sudeste				Sudoeste				
	MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		MW/ano		Tempo (anos)		
	50 Km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	50 km	100 km	
1	457,6	790,9	45,7	79,0	192,7	569,3	19,2	56,9	298,1	1.053	29,8	105,3	
2	418,4	1.251	41,8	125,1	107,7	974,1	10,7	97,4	504,8	1.873	50,4	187,3	
3	408,8	1.343	40,8	134,1	356,8	300,6	35,6	30,0	382,7	1.049	38,2	104,9	
4	428,2	812,1	42,8	81,2	209,8	810,9	20,9	81,0	495,8	1.850	49,5	185,0	
5	455,1	269,5	45,5	26,9	107,3	1.001	10,7	100,1	310,6	1.301	31,0	130,1	
Média	433,6	893,4	43,3	89,3	194,8	731,3	19,4	73,1	398,4	1.425	39,8	142,5	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A média para a distância de 50 km foi de 398,4 MW/ano, quanto ao período de atividade, foi de 39,8 anos. Já para a distância de 100 km, 1.624 MW/ano e uma estimativa de funcionamento e 162,4 anos. O Baixo Amazonas foi a segunda localidade que apresentou os maiores resultados. A média de geração de energia, quando incluso a distância de 50 km, foi de 341,7 MW/ano, para o período de funcionamento foi de 43,1 anos. Para a busca de até 100 km, foi de 1.434 MW/ano, funcionando por cerca de 143,4 anos.

O Marajó apareceu em seguida, o valor de 424,7 MW/ano foi a média encontrada para esta localidade, sendo que o tempo de trabalho das usinas seria de 42,4 anos. Ao adicionar a busca de 100 km, este potencial saltou para 986,2 MW/ano, e o tempo de atividade, para 98,6 anos. A média de geração de energia para o Nordeste foi de 433,6 MW/ano, na qual as termelétricas funcionariam por cerca de 43,3 anos. No percurso de 100 km, a média obtida foi de 893,4 MW/ano, com tempo de atividade estimado em 89,3 anos. A média para o Sudeste, abrangendo a distância de 50km, foi de 194,8 MW/ano, o tempo de operação alcançado foi de 19,4 anos. Para a distância de 100km, as usinas poderiam gerar

731,3 MW/ano, em 73,1 anos. Por fim, caracterizando-se como uma das principais regiões urbanas da Amazônia, Belém não apresentou potenciais energéticos muito elevados quando comparados as demais áreas. A média para 50 km e 100 km foi a mesma, sendo de 62,7 MW/ano, o período médio de trabalho foi de 6,2 anos. Considerando os Centros Urbanos, as áreas destacadas para instalação de termelétricas de base florestal foram: Terra Santa, Óbidos, Novo Progresso, Jacareacanga, Monte Alegre, Medicilândia, Santana do Araguaia, Canaã dos Carajás, Chaves, Anajás, Portel, Cachoeira do Piriá, Castanhal, Capanema, Mãe do Rio, Belém, Santa Bárbara do Pará, Cachoeira do Arari, Barcarena, Igarapé Miri, Anapu e Tailândia. Abrangendo a distância de 100 km, observou-se Novo Progresso, Jacareacanga, São Félix do Xingu, Trairão, Oriximiná, Prainha, Belterra, Placa, Medicilândia, Anapu, Portel, Gurupá, Almeirim, Currealinho, Afuá, Santa Cruz do Arari, Tomé-Açu, Ulianópolis, Colares, Belém, Castanhal, Bujaru, Nova Esperança do Piriá, Tracuateua, Santa Bárbara do Pará, Pau D'arco, Curionópolis e Mocajuba.

O estado do Pará, é o segundo maior estado do país em extensão, possui uma área de 1.252.870.704 km² e uma população estimada em 8.777.124 pessoas (IBGE, 2022). É o estado amazônico que mais consome energia, em 2022 foram 1.572.271 MWh (EPE, 2023). Em 2022, contou-se 77 usinas, das quais 60 são abastecidas com óleo diesel e apenas 8 empregam os resíduos florestais na produção de energia elétrica, totalizando, 27,5 MW (ANEEL, 2023). Nos sistemas isolado, essa localidade conta com 18 usinas, produzindo uma carga anual de 37 MW/ano (ONS, 2022).

Nas áreas potenciais, o Baixo Amazonas está deixando de aproveitar 20 vezes o potencial atualmente instalado. Se for considerado a distância de 100 km, onde as usinas são alimentadas com uma quantidade maior de biomassa, o Pará poderia contar com uma produção de eletricidade cerca de 68 vezes maior. Em relação aos centros urbanos, o Sudoeste geraria 14 vezes mais do que se tem hoje em dia em operação em todo o estado. Considerando o percurso de 100 km, o Sudoeste está deixando de aproveitar 52 vezes o potencial disponível. Desse modo, é notado que novas ações precisam ser elaboradas para que esse potencial possa ser aproveitado.

Em relação a infraestrutura do estado, o Pará conta com uma rede de transporte composta por rodovias, ferrovias e hidrovias. O sistema de transportes inclui, ainda, dois portos marítimos (Belém e Vila do Conde) e um porto fluvial (Santarém). O porto de Belém situa-se na margem direita da Baía de Guajará, cerca de 110 km do Oceano Atlântico. Os principais produtos movimentados nesse porto são: bauxita, madeira e derivados de petróleo

(BRASIL, 2000). O porto de Vila do Conde está situado no município de Barcarena, onde localizam-se as indústrias Albrás e Alunorte. O porto de Santarém localiza-se na margem direita do rio Tapajós, próximo à confluência com o rio Amazonas. Os principais produtos movimentados são: madeira e granéis líquidos (inflamáveis) (BRASIL, 2000).

As principais rodovias são as federais BR-010, BR-163, BR-230, BR-316 e a estadual transitória PA-150/BR-158. A BR-010 é o trecho paraense da Belém-Brasília, que é uma rodovia de integração nacional e constitui a ligação rodoviária de longo alcance mais bem sucedida da Amazônia. Com uma extensão total de 2.039 km, dos quais, 470 km em território paraense. A BR-163, que liga Santarém a Cuiabá, é de grande importância regional, por atravessar região de alto potencial econômico e por se constituir em alternativa para o escoamento das riquezas do centro do Brasil em direção ao porto de Santarém. A BR-230 corta o estado do Pará de leste a oeste, passando pelas cidades de Marabá, Altamira, Itaituba e Jacareacanga (BRASIL, 2000).

A BR-316, que liga Belém a Maceió, representa um importante elo de ligação da região Amazônica com a região Nordeste, cortando todo o sertão nordestino. A rodovia PA-150/BR-158 liga o Pará ao sul do país, iniciando em Altamira. A rede hidrográfica, principalmente compreendida pela bacia Amazônica, constitui-se na opção de transporte mais viável, fazendo com que a modalidade hidroviária seja a de maior aptidão para a região. A navegação na bacia Amazônica apresenta características muito particulares, enquanto o rio Amazonas possui excelentes condições de navegabilidade, a maioria dos demais rios e canais sofrem alterações pelo assoreamento. Os principais rios são o Amazonas, Tapajós, Xingu, Trombetas, Jari e Tocantins/Araguaia (BRASIL, 2000).

4.4 CONCLUSÃO

Este estudo buscou analisar a localização ótima para instalação de termelétricas de base florestal no bioma Amazônia. Considerou-se dois modelos, no primeiro, abrangeu-se todas as áreas potenciais para instalação, no segundo, apenas as áreas urbanas. Os modelos foram configurados para comportarem 5 termelétricas por estado, na qual a biomassa poderia ser fornecida a partir de duas distâncias, sendo 50 km e 100 km. Os resultados mostraram que a quantidade de termelétricas originadas nas áreas potenciais foi muito superior às situadas nas áreas urbanas. As usinas situadas nas localidades potenciais apresentaram maiores potenciais de geração de energia elétrica, as termelétricas das áreas urbanas,

apresentaram valores menores, no entanto, ainda satisfatórios e competitivos. Os estados que produziram a maior geração de energia elétrica baseados na biomassa florestal seriam Roraima e Amapá.

A modelagem para encontrar as melhores localizações é complexa e requer uma cuidadosa avaliação das características locais. É necessário analisar variáveis de ordem legal, ambiental, social e de logística, para assim, selecionar as áreas mais viáveis. Este estudo, permitiu indicar as localidades com maiores potenciais para a introdução da bioenergia no bioma Amazônia, e assim, incentivar o uso de uma das energias renováveis com maior potencial nessa região e que atualmente não é bem aproveitada. Além disso, contribuiu com estimativas de geração de energia derivadas do resíduo do processamento da madeira, raramente esses dados são encontrados na literatura. A metodologia utilizada é acessível à investidores ou instituições interessadas em expandir a temática aqui apresentada.

4.5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. 2022. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 02 abril 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Banco de Informações de Geração**. 2023. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em abril de 2023.

ALVARES *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.

ALVES, F. F. Localização industrial do Nordeste - Análise de alguns indicadores 1959-1970-1975-1980. **Revista Econômica do Nordeste**. v.14 n.2, Fortaleza, 1983.

ANDRADE, M. *et al.* Produção de madeira e diversidade de espécies arbóreas exploradas na Amazônia brasileira: situação atual e recomendações para o setor florestal. 2022. Timberflow: a plataforma da madeira – IMAZON. 2022.

ARENALES *et al.* 2011. Pesquisa operacional. Elsevier, Rio de Janeiro.

BARNI, P. E. *et al.* Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 377, p. 170-181, 2016.

BRASIL. Lei Federal n.º 11.284, de 2 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nos 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972,

9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF., 3 mar. 2006.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decreto, etc. Presidência da República. Portaria MINTER no 124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas para a localização de indústrias potencialmente poluidoras junto à coleções hídricas. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Resolução CONAMA nº 013 de 06 de dezembro de 1990. Dispõe sobre normas referentes às atividades desenvolvidas no entorno das Unidades de Conservação. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decretos, etc. Presidência da República. Resolução Conama, no 4, de 9 de outubro de 1995. Estabelece as Áreas de Segurança Portuária – ASAs. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Leis e decreto, etc. Presidência da República. Portaria no 1.141/GM5, de 8 de dezembro de 1987. Dispõe sobre zonas de proteção e aprova o plano básico de zona de proteção de aeródromos, o plano básico de zoneamento de ruído, o plano básico de zona de proteção de helipontos e o plano de zona de proteção de auxílios à navegação aérea e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Casa Civil.

BRASIL. Transportes em Roraima. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/rr-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes em Rondônia. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/ro-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Pará. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pa-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Amazonas. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/am-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Acre. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/ac-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Maranhão. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/ma-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Tocantins. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/to-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Amapá. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/ap-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BRASIL. Transportes no Mato Grosso. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/mt-2000-pdf>. Acesso em abril 2023.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *The journal of soil science*, Oxford, v.31, p.315-331, 1980.

CHUKWUMA, E. C. Facility location allocation modelling for bio-energy system in Anambra State of Nigeria: Integration of GIS and location model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 460-467, 2019.

COMBER, A. *et al.* Locating bioenergy facilities using a modified GIS-based location–allocation-algorithm: Considering the spatial distribution of resource supply. **Applied Energy**, v. 154, p. 309-316, 2015.

COSTA, T. S.; VILLALVA, M. G. Technical evaluation of a PV-diesel hybrid system with energy storage: Case study in the Tapajós-Arapiuns Extractive Reserve, Amazon, Brazil. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2969, 2020.

DA SILVA LUZ, E. *et al.* Challenges of the lumber production in the Amazon region: relation between sustainability of sawmills, process yield and logs quality. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 4924-4948, 2021.

DANESHZAND, F.; SHOELEH, R. Facility Location, Contributions to Management Science. Physica-Verlag HD, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2>. 2009

DASKIN, M. S. Network and Discrete Location. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118032343>. 1995.

DONDA JÚNIOR. A. **Fatores influentes no processo de escolha da localização agroindustrial no paraná: estudo de caso de uma agroindústria de aves**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2002.

DONG, J. **GIS and location theory based bioenergy systems planning**. 2008. 126 p. Master of Applied Science in Systems Design Engineering. University of Waterloo. Ontario, 2008.

EISELT, H.; MARIANOV, V. **Foundations of Location**, International Series in Operations Research & Management Science. **Springer US**, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7572-0>. 2011.

EISELT, H. A.; SANDBLOM, C. L. **Decision Analysis, Location Models, and Scheduling Problems**. **Springer Berlin Heidelberg**, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24722-7>. 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Acesso em: abril 2023.

FISHER, P. The pixel: a snare and a delusion. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 3, p. 679-685, 1997.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: Modelos e Algoritmos**, 2nd ed. Elsevier, Rio de Janeiro. 2005.

HUBBELL, S. P. *et al.* How many tree species are there in the Amazon and how many of them will go extinct? **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. Supplement 1, p. 11498-11504, 2008.

HUGHES, S.; PARTZSCH, L.; GASKELL, J. The development of biofuels within the context of the global water crisis. **Sustainable Dev. L. & Pol'y**, v. 7, p. 58, 2006.

HURTER, A. P.; Martinich, J. S.; **Facility Location and the Theory of Production**. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2518-2.1989>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativa da população residente no Brasil e unidades da Federação**. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação brasileira**. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000**. Rio de Janeiro, 2019. 164 p. (Série relatórios metodológicos, v. 45). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 30 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS. **Manejo sustentável autorizado pelo Ibama em 2019 totalizou 39 mil hectares**. 2020.

Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/ultimas/2142-manejo-sustentavel-autorizado-pelo-ibama-em-2019-totalizou-39-mil-hectares>. Acesso em: 23 Fev. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/to.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ac.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rr.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ro.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/to.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>. Acesso em: março 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt.html>. Acesso em: março 2023.

IMAZON. Estradas cortam ou se aproximam 41% da área de floresta na Amazônia, mostra mapeamento inédito. 2022. Disponível em: <https://amazon.org.br/imprensa/estradas-cortam-ou-se-aproximam-de-41-da-area-de-floresta-na-amazonia-mostra-mapeamento-inedito/>. Acesso em abril de 2023.

KLOSE, A.; DREXL, A. **Facility location models for distribution system design**. Eur.J. OPER. Res. 162, 4–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.031>. 2005.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2. ed. Ver e ampl. São Paulo: **Editora UNESP**, 2003.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. Linear and Nonlinear Programming, International Series in Operations Research & Management Science. **Springer International Publishing**, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18842-3>. 2016.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Legislação da Amazônia**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudam/pt-br/aceso-a-informacoes/institucional/legislacao-da-amazonia>. Acesso em: 08 jan 2023.

DA SILVA OLIVEIRA, Rafael. As transformações na organização espacial do estado de Roraima: uma conversa inicial a partir da BR-174. **Acta Geográfica**, v. 1, n. 1, p. 45-65, 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. **Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2021**. 2021. <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/DPL-REL-0250-2020%20-%20PEN%20SISOL%202021.pdf>. Acesso em 28 Abr. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. **Plano SISOL 2022**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Revista%20-%20PEN%20SISOL%202022.pdf>. Acesso em abril de 2023.

PADBERG, M.; RIJAL, M. P. Location, Scheduling, Design and Integer Programming, International Series in Operations Research & Management Science. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1379-3>. 1996.

PINHEIRO, A. S. O. *et al.* Study of seed rain in stretch of Submontane Open Ombrophilous Forest. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 2, p. 339-344, 2018.

RAMOS, R. A. R. **Localização industrial – Um modelo espacial para o Noroeste de Portugal**. 2000. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2000.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Plano Anual de Outorga Florestal 2020**. MAPA. Brasília, 2019.

SILVA, C. A. *et al.* Fire occurrences and greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 376, 2021.

SILVA JÚNIOR, M. C.; BARROS, N. F.; CÂNDIDO, J. F. Relações entre parâmetros do solo e da vegetação de cerrado na Estação Florestal de Experimentação e Paraopeba – MG. **Revista brasileira de botânica**, São Paulo, v. 10, p.125-137, 1987.

SULTANA, A.; KUMAR, A. Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system. **Applied Energy**. v. 94, p. 192-201. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.01.052. 2012.

SULE, D. R. Logistics Of Facility Location And Allocation, 1º. ed, Logistics of Facility Location and Allocation. Marcel Dekker, Inc., Ruston, Louisiana. 2001.

TEIXEIRA, T. R. *et al.* **Cenários para instalação de usinas de biomassa florestal em Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Programa de pós graduação em Ciências Florestais. 2016.

TEIXEIRA, T. R. *et al.* Forest biomass power plant installation scenarios. **Biomass and Bioenergy**, v. 108, p. 35-47, 2018.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou quantificar e espacializar a biomassa florestal no bioma Amazônia. Além disso, mostrou as melhores regiões nos estados para a instalação de termelétricas florestais com base na disponibilidade e potencial elétrico gerado. Dividiu-se esta dissertação em três artigos científicos. No primeiro, foi realizada uma revisão, por meio de uma análise bibliométrica e revisão sistemática de literatura, sobre a pegada de carbono e otimização da oferta da bioeletricidade florestal. No capítulo dois, analisou-se a disponibilidade de biomassa florestal acima do solo sob manejo florestal sustentável para bioenergia no bioma Amazônia. Considerou-se a fitofisionomia predominante na região, isto é, as florestas Ombrófilas. No último artigo, analisou-se a localização ótima para instalação de termelétricas florestais. A metodologia do segundo e terceiro artigo foi realizada em ambiente SIG, por meio do aplicativo ARCGis, versão 10.5.

No primeiro artigo, analisou-se uma amostra de 89 documentos científicos concentrados em bioenergia florestal, distribuídos no período de 1993 a 2020. Utilizou-se as bases ISI Web of Science e Scopus para o levantamento bibliográfico. As análises realizadas foram: palavras-chaves, publicações por países, principais periódicos e evolução anual das publicações. Os estudos foram classificados, na Análise de Conteúdo, quanto a temática, ao enfoque da pesquisa e as ferramentas metodológicas predominantes.

No segundo artigo, foi estimada a biomassa acima do solo, a madeira comercial – sob manejo florestal sustentável – e os resíduos resultantes da fase do rendimento da madeira. Considerou-se esses resíduos para serem empregados no processo de geração de energia. Para calcular a biomassa acima do solo, utilizou-se a Cokrigagem, empregando como variável principal, parcelas amostrais previamente calculadas e como secundárias, a precipitação anual e a vegetação por classe de fitofisionomia.

No terceiro, empregou-se dois modelos de alocação, no primeiro, para encontrar as áreas aptas, excluiu-se as áreas impróprias. Considerou-se restrições legais, ambientais ou

estratégicas. As regiões resultantes após a exclusão das áreas inapropriadas foram consideradas como áreas potenciais para receber as termelétricas. No segundo, apenas as áreas urbanas do bioma seriam regiões potenciais. Configurou-se os modelos para alocar 5 termelétricas por estado, na qual a biomassa poderia ser fornecida a partir de duas distâncias, sendo 50 km e 100 km. Calculou-se a biomassa florestal disponível e o potencial de energia que seria gerado com base nos resíduos do processamento da madeira comercial. Tais modelos, foram utilizados com o objetivo de verificar se as localizações mudariam consideravelmente considerando os pontos de escoamento, polo consumidor e a mão de obra.

No primeiro artigo, foi evidenciando que durante o período de 2011 a 2015, concentrou-se a maior quantidade de publicações. Os artigos da amostra de 89 documentos foram originados de 27 países, sendo que o Canadá foi o país de maior relevância. Ao analisar os continentes, a Europa obteve a maior participação, concentrando 17 países e 60 produções científicas. A América do Norte veio em seguida com Canadá e Estados Unidos, somando 39 artigos. A Ásia, foi o terceiro continente com a maior relevância, contou-se 6 países e 19 estudos científicos. Na Análise de conteúdo, verificou-se que as temáticas predominantes foram: Otimização, com 69 artigos, e Estudos Ambientais, com 20. As publicações de otimização concentraram-se em três enfoques: Potencial e/ou disponibilidade de biomassa florestal, Gerenciamento da cadeia de abastecimento da biomassa e Localização ótima para instalação de termelétricas. Nos Estudos Ambientais foram: avaliação de impactos ambientais e legislação para a bioenergia. Os modelos de simulação, pesquisa bibliográfica e avaliação do ciclo de vida foram as ferramentas metodológicas predominantes.

O segundo estudo apontou que Roraima seria a localidade que produziria o maior volume de biomassa florestal, isto é, 397,2 Mg ha⁻¹. Os resultados obtidos para este estado permaneceram dentro da média de dados gerados por estudos anteriores. O volume de biomassa acima do solo obtido demonstra a boa conservação de suas florestas. Além disso, essa região está distante dos principais polos de desmatamento da Amazônia. Considerando o bioma como um todo, a vegetação Ombrófila Densa Montana apresentou a maior média, sendo de 428,9 Mg ha⁻¹, enquanto a floresta Ombrófila Aberta Aluvial alcançou a menor, 256,5 Mg ha⁻¹. A fitofisionomia que obteve a maior área foi a Ombrófila Aberta Aluvial com 16.765.045 ha. Considerando a geração de energia com base nos resíduos da madeira comercial, o Amazonas foi o estado com maior relevância, sob manejo sustentável geraria,

em média, 13.023 MW/ano, já abrangendo o potencial total, a produção seria de 223.772 MW/ano, mais de 15 vezes superior ao potencial sob manejo.

No último artigo, notou-se que na distância de 50 km para as áreas potenciais, na maioria dos estados, as termelétricas se situariam nas proximidades de estradas. No entanto, no Pará, Mato Grosso e Amazonas, tais indústrias ficariam mais próximas aos rios. Já na distância de 100 Km, os empreendimentos foram situados, principalmente, nas proximidades dos corpos hídricos. Tais indústrias se movimentaram de acordo com a necessidade de abarcar mais pontos de biomassa ao seu entorno e assim, gerar mais energia. O estado que apresentou o maior potencial foi Roraima, todos os valores para a distância de 50 km ficaram acima de 400 MW/ano e a grande maioria dos dados para a distância de 100 km ultrapassaram 2000 MW/ano. Quanto ao período de atuação das usinas, para as de 50 km, a maioria trabalharia por mais de 42 anos, e para a distância de 100 km, a maior parte ficaria ativa por mais de 200 anos. Para a restrição das áreas urbanas, Roraima também apresentou os melhores resultados, no entanto, tais dados foram menores quando comparadas aos obtidos pelas termelétricas localizadas nas áreas potenciais. Uma parcela dos valores para a distância de 50 km ficou acima de 400 MW/ano. Nos casos de 100 km, a grande maioria dos pontos apresentaram dados maiores que 1000 MW/ano. Quanto ao tempo de operação, para a primeira distância, a maioria das usinas teriam um tempo de trabalho superior a 30 anos, já para a segunda, os anos subiram para mais de 100. Em relação a quantidade de usinas por estado, o Amazonas e o Pará, abarcariam o maior número, devido a sua extensão.

O primeiro estudo trouxe grandes contribuições ao explicar os pontos centrais de pesquisas concentradas em bioenergia florestal. Evidenciando quais as principais temáticas de pesquisa, focos e ferramentas metodológicas. Desse modo, novos estudos podem mirar diretamente nas características aqui reveladas e enriquecer suas produções. O segundo e terceiro artigo, trouxeram uma metodologia de fácil acesso, simples e reproduzível. Os resultados evidenciaram contribuições de grande importância, destacando as localidades com os maiores volumes de biomassa e aonde a bioenergia teria melhor aproveitamento com base na energia gerada dos resíduos da madeira comercial. Outro ponto relevante, foi a visualização dos municípios que obtiveram os melhores potenciais para receber a instalação de usinas termelétricas, como foi abordado no artigo três.

Todos os objetivos definidos foram alcançados, trazendo resultados inovadores. Este estudo trouxe informações inéditas que podem ser aproveitadas para complementar estudos futuros. Além disso, tais dados permitem que órgãos governamentais mapeiem a biomassa

na Amazônia, permitindo uma melhor gestão e controle do uso deste recurso. Por fim, analisando os resultados obtidos, a bioenergia poderia atender as localidades mais distantes das capitais, que não possuem fornecimento de energia elétrica, e em outras áreas, serviria como complementação, diversificando a matriz energética local.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 23 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração**. 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: abr. 2022.

ANDRADE, M. *et al.* Produção de madeira e diversidade de espécies arbóreas exploradas na Amazônia brasileira: situação atual e recomendações para o setor florestal. 2022. Timberflow: a plataforma da madeira – IMAZON. 2022.

BIAZATTI, S. C. *et al.* Planejamento e produção florestal em área de concessão na Amazônia Ocidental/Planning and forest production in concession area in the western Amazon. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8938-8953, 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 406, de 02 de fevereiro de 2009**. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. Brasília, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: Ano base 2019**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf.

FEITOSA, B. C. Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará. **Revista da Madeira**, n. 144, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Potencial Energético do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira. **Ministério de Minas e Energia: Brasília, Brazil**, 2018.

FEITOSA, B. da C. Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará. **Revista da Madeira**, n. 144, 2008.

FERREIRA, A. B. F. Modelagem da biomassa e dinâmica do carbono em áreas de concessão florestal no Sudeste da Amazônia brasileira. 2019.

FERREIRA, C. E. M.; CARRASCO, E. V. M.; HELMEISTER, J. C. Tecnologia de adesivos poliuretanos: propriedades e aplicações em madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 3., 1989, São Carlos. Anais... São Carlos: LaMEM/EESC-USP, 1989. p. 39 – 74.

GOVERNO DO BRASIL. **Mais de 80 mil Famílias Terão Acesso à Energia Limpa em Comunidades da Amazônia.** 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/09/mais-de-80-mil-familias-terao-acesso-a-energia-limpa-em-comunidades-da-amazonia>. Acesso em: 04 jun 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapas de Bioma e Vegetação.** 2004. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/mapas/GEBIS%20-%20RJ/map6083.jpg>. Acesso em: 22 fev 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação brasileira.** 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Manejo sustentável autorizado pelo Ibama em 2019 totalizou 39 mil hectares 2020. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/ultimas/2142-manejo-sustentavel-autorizado-pelo-ibama-em-2019-totalizou-39-mil-hectares#:~:text=O%20manejo%20florestal%20sustent%C3%A1vel%20C3%A9,a%20extra%C3%A7%C3%A3o%20de%20cada%20esp%C3%A9cie>. Acesso em abril de 2023.

IEA BIOENERGY. **Bioenergy, a sustainable solution.** 2021. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/bioenergy-a-sustainable-solution/>. Acesso em: 19 Mai. 2022.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Bioenergy.** 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/bioenergy>. Acesso em: 1 Jul. 2021.

LENTINI, M. *et al.* O Que Mudou no Perfil da Atividade Madeireira na Amazônia nas Últimas Duas Décadas (1998-2018). **Piracicaba: Imaflora**, 2019.

MAHESH, A.; JASMIN, K.S. Role of renewable energy investment in India: An alternative to CO2 mitigation. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 26, p. 414-424, 2013.

MARTINI, A. M. Z; ROSA, N. de A.; UHL, Christopher. An attempt to predict which Amazonian tree species may be threatened by logging activities. **Environmental Conservation**, v. 21, n. 2, p. 152-162, 1994.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mapas de cobertura vegetal dos biomas brasileiros.** 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. **Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2021.** 2021.

<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/DPL-REL-0250-2020%20-%20PEN%20SISOL%202021.pdf>. Acesso em 28 Abr. 2021.

REN21. What is renewable energy importante?. 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/why-is-renewable-energy-important/>. Acesso em: 02 março de 2023.

ROCHA, M. P. Técnicas e planejamento em serrarias. Ed. rev. ampl. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2002. 121 p.

RICHARDSON, V. A.; PERES, C. A. Temporal decay in timber species composition and value in Amazonian logging concessions. **PloS one**, v. 11, n. 7, p. e0159035, 2016.

RUIVO, M. L. P. *et al.* Gestão florestal e implicações sócio-ambientais na amazônia oriental (estado do Pará). *Oecologia Brasiliensis*, 2007.

ROMERO, F. M. B. *et al.* Forest management with reduced-impact logging in amazonia: Estimated aboveground volume and carbon in commercial tree species in managed forest in Brazil's state of acre. **Forests**, v. 12, n. 4, p. 481, 2021.

SAIDI, K.; OMRI, A. Reducing CO2 emissions in OECD countries: do renewable and nuclear energy matter?. **Progress in Nuclear Energy**, v. 126, p. 103425, 2020.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Boletim SNIF 2017: Sistema Nacional de Informações Florestais**. Brasília, DF, 2017.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Florestas do Brasil em Resumo 2019**. MAPA. Brasília, DF, 2019.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Plano Anual de Outorga Florestal 2020**. MAPA. Brasília, DF, 2021.

STEELE, P. H. Factors determining lumber recovery in sawmilling. Madison: US. Forest Service. 1984, 8 p. (General Technical Report. FPL, n. 39).

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report**. 2022. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2023.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazifs biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95, 2017.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Global Bioenergy Statistics. 2020**.