



VII PRÊMIO

Serviço Florestal Brasileiro
em Estudos de Economia
e Mercado Florestal

A ECONOMIA E O MERCADO FLORESTAL
BIOECONOMIA COM INTERFACE COM AS ATIVIDADES DE BASE FLORESTAL

OFERTA DE BIOENERGIA E LOCALIZAÇÃO ÓTI- MA PARA INSTALAÇÃO DE TERMOELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL NO BIOMA AMAZÔNIA

JOICE MARTINS
EVANDRO FERREIRA DA SILVA
KAISE BARBOSA DE SOUZA
LUIZ MOREIRA COELHO

Brasília - DF
2023

Apoio:



Realização:



MINISTÉRIO DA
GESTÃO E DA INOVAÇÃO
EM SERVIÇOS PÚBLICOS

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE E
MUDANÇA DO CLIMA



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 – e assim, diversificar a matriz elétrica dessa região. 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. Mais especificamente: quantificou a biomassa acima do solo e a energia gerada com base nos resíduos do beneficiamento da madeira comercial. analisou a localização ótima para instalação de termelétricas florestais. A metodologia foi desenvolvida em ambiente SIG que calculou a biomassa acima do solo por meio Cokrigagem e gerando informações da biomassa para o bioma Amazônia. Calculou-se o total disponível por estado, a porção de madeira comercial, o percentual de resíduos que seriam gerados na fase de beneficiamento e o potencial de energia elétrica que poderia ser produzido por meio desses resíduos. Para a localização ótima para instalação de termelétricas de base florestal, empregou-se dois modelos de alocação para encontrar áreas aptas e áreas urbanas potenciais. Alocou-se 5 termelétricas por estado próximas aos pontos de escoamento (hidrografias, estradas e linhas de transmissão), fornecida a partir de duas distâncias (50 km e 100 km). Os resultados evidenciaram que Roraima (397,2 Mg ha⁻¹) e Amapá (348,3 Mg ha⁻¹) tiveram maiores valores de biomassa acima do solo e Amazonas e Pará maior geração de energia, em função da disponibilidade de biomassa. Sob manejo sustentável foram 13.023 MW/ano e 9.166 MW/ano, respectivamente, e sob o potencial total, estas regiões produziram: 223.772 MW/ano e 157.498 MW/ano. Abrangendo a localização ótima, as usinas localizadas em Roraima obtiveram o maior potencial elétrico, para a distância de 50 km, elas gerariam cerca de 400 MW/ano, funcionando por 42 anos. Para 100 km, a geração seria de 2.000 MW/ano, operando, em média por 200 anos. Para a restrição das áreas urbanas, Roraima também apresentou os melhores resultados. Para distância de 50 km ficou acima de 400 MW/ano, com uma vida útil de mais de 30 anos. Nos casos de 100 km, a grande maioria dos pontos apresentaram dados maiores que 1000 MW/ano e operariam por cerca de 100 anos. Este estudo trouxe informações importantes orientação de políticas públicas e tomada de decisão para instalação de termelétricas e de base florestal no bioma Amazônia.

Palavra-chave: Economia Florestal. Bioeletricidade Florestal. Transição energética

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 in the generation of renewable electrical energy – bioenergy – and thus diversify the electrical matrix in this region. 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. More specifically: it quantified the aboveground biomass and the energy generated based on residues from commercial wood processing. analyzed the optimal location for installing forest thermoelectric plants. The methodology was developed in a GIS environment that calculated the aboveground biomass through Cokriging and generating biomass information for the Amazon biome. The total available per state, the portion of commercial wood, the percentage of residues that would be generated in the processing phase and the potential for electric energy that could be produced through these residues were calculated. For the optimal location for the installation of forest-based thermoelectric plants, two allocation models were used to find suitable areas and potential urban areas. 5 thermoelectric plants per state were allocated close to the drainage points (hydrographs, roads and transmission lines), supplied from two distances (50 km and 100 km). The results showed that Roraima (397.2 Mg ha⁻¹) and Amapá (348.3 Mg ha⁻¹) had higher aboveground biomass values and Amazonas and Pará higher energy generation, due to biomass availability. Under sustainable management, they were 13,023 MW/year and 9,166 MW/year, respectively, and under full potential, these regions would produce: 223,772 MW/year and 157,498 MW/year. Covering the optimal location, the plants located in Roraima had the highest electrical potential, for a distance of 50 km, they would generate about 400 MW/year, operating for 42 years. For 100 km, the generation would be 2,000 MW/year, operating, on average, for 200 years. For the restriction of urban areas, Roraima also presented the best results. For a distance of 50 km it was above 400 MW/year, with a useful life of more than 30 years. In cases of 100 km, the vast majority of points had data greater than 1000 MW/year and would operate for about 100 years. This study brought important information for public policy guidance and decision-making for the installation of thermoelectric and forest-based plants in the Amazon biome.

Keywords: Forest Economy. Renewable energy. Forest Bioelectricity. Energy transition.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	5
2	OBJETIVOS	7
3	Referencial teórico	7
3.1	Madeira comercial sob manejo florestal sustentável disponível para a bioenergia na Amazônia.	7
3.2	Bioenergia e a matriz elétrica do bioma Amazônia	8
4	MATERIAL E MÉTODOS	10
4.1	Área de estudo	10
4.2	Oferta de biomassa florestal acima do solo no bioma Amazônia.	11
4.2.1	Estimativa da biomassa acima do solo para o Bioma Amazônia	16
4.2.2	Estimativa de madeira comercial e potencial energético	17
4.3	Localização ótima para instalação de termelétricas de base florestal na Amazônia	18
4.3.1	Banco de dados para as zonas restritivas	18
4.3.2	Exclusão das áreas impróprias para instalação de termelétricas de base florestal	18
4.3.3	Áreas aptas à instalação de termelétricas de base florestal	19
4.3.4	Quantificação da biomassa acima do solo no bioma Amazônia	20
4.3.5	Configuração do modelo de alocação de termelétricas e acesso a biomassa	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1	Dimensionamento da oferta de biomassa florestal no bioma Amazônia	21
5.2	Potencial energético total e sob manejo florestal sustentável na Amazônia	26
5.3	Locais aptos para a instalação de termelétricas florestais	31
5.3.1	Roraima	35
5.3.2	Acre	37
5.3.3	Rondônia	38
5.3.4	Amazonas	39
5.3.5	Amapá	42
5.3.6	Mato Grosso	44
5.3.7	Maranhão	45
5.3.8	Tocantins	46
5.3.9	Pará	47
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53



01 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 florestal varia espacial e temporalmente, dependendo dos tipos de ecossistemas (HOUGHTON et al., 2009). Um problema comum atualmente em florestas 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 para trazer informações sobre a magnitude, a localização e o comportamento das fontes e sumidouros terrestres de carbono (RAMIREZ, 2015).

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. 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 uteis 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).

O sensoriamento remoto auxilia ainda, na escolha das melhores localidades para a instalação de termelétricas florestais. 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 de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas - 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).

Quantificar e analisar a espacialização da biomassa florestal 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 nas regiões com os maiores volumes.

02 OBJETIVOS

O objetivo desta monografia foi analisar a oferta de bioenergia florestal e localização ótima para instalação de termoelétricas de base florestal no bioma Amazônia. Mais especificamente, analisar a biomassa total acima do solo disponível, desse total, quantificar a porção comercial e os resíduos madeireiros gerados na fase do beneficiamento. Quantificar a geração de energia elétrica produzida a partir dos resíduos e por fim, analisar a localização ótima para instalação de termelétricas florestais para bioenergia.

03 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. MADEIRA COMERCIAL SOB MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DISPONÍVEL PARA A BIOENERGIA NA AMAZÔNIA

A quantidade de madeira apta à comercialização é definida pelo volume comercial ($m^3 h^{-1}$) 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 m^3 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 $30 m^3 h^{-1}$ (SFB, 2019).

A madeira comercial ao deixar a floresta, passa pelo 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.

3.2. BIOENERGIA E A MATRIZ ELÉTRICA DO BIOMA AMAZÔNIA

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 am-

bientais, 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). Nesse sentido, observa-se a necessidade de ampliação da matriz energética amazônica.

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).

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). Desse modo, percebe-se a necessidade da ampliação de fontes renováveis nesta localidade.

04 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi desenvolvida em ambiente SIG, no software Arcgis versão 10.5. 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 o potencial total, sem restrição.

Para encontrar a localização ótima para instalação de termelétricas florestais, calculou-se a geração de energia com base na biomassa disponível nas proximidades das usinas. Por fim, elaborou-se os modelos de distância de busca de biomassa para tornar o projeto viável.

4.1. 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; DA 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 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 são as florestas ombrófilas abertas 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 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).

4.2. OFERTA DE BIOMASSA FLORESTAL ACIMA DO SOLO NO BIOMA AMAZÔNIA.

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 MapBiomas. 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.

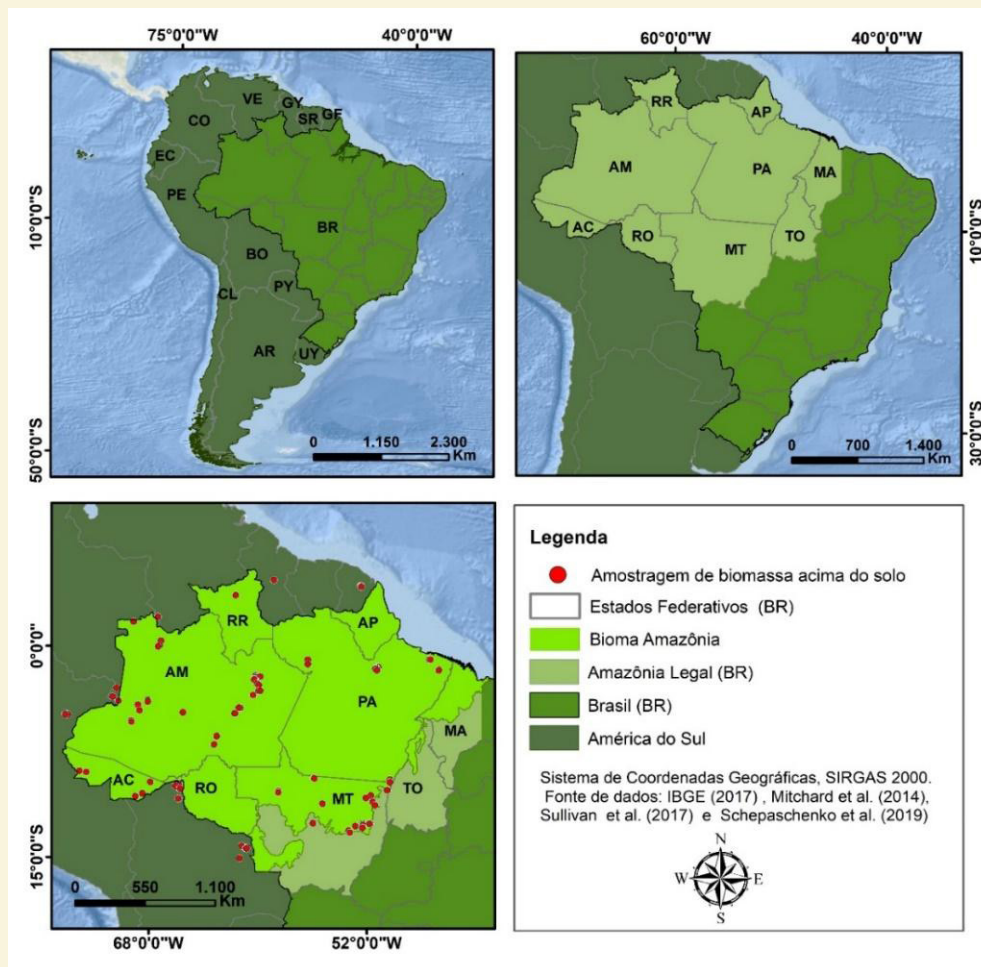
As fitofisionomias florestais foram configuradas a partir do mapa de vegetação fornecido pelo IBGE, em uma escala de 1:250.000, na versão 2017. Esse mapa foi formado com base nas imagens do sensor do satélite LM Landsat e a definição das fitofisionomias segue o Manual técnico da vegetação brasileira (IBGE, 2012) e Velloso; 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).

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. As informações sobre os dados de biomassa já vieram previamente calculadas em $Mg\ ha^{-1}$ e cada ponto amostral continha informações para 1 hectare. Na **Figura 1**, vê-se a área de estudo – bioma Amazônia – bem como, os pontos de amostragem de biomassa acima do solo mencionados anteriormente.

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). Abaixo, na Tabela 1 está disposto os vetores utilizados na montagem do banco de dados e a sua respectiva fonte.

Para espacializar a biomassa acima do solo, analisou-se quatro técnicas. A krigagem ordinária (krig ord), a cokrigagem, cuja a variável auxiliar foi a vegetação por classe de 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).

Figura 1. Distribuição do bioma Amazônia em território brasileiro e pontos de biomassa acima do solo obtidos em campo.



Fonte: Mitchard et al. (2014); Sullivan et al. (2017) e Schepaschenko et al. (2019)

Tabela 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	MapBiomias (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: Os autores, 2023.

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 1), Erro Quadrático Médio (EQM) sugerido por Phillips; Dolph; Marks (1992) (Equação 2), percentual de eficiência (EF%) levantado por Greenwood; Neeteson; Draycott (1985) (Equação 3), coeficiente de determinação ajustado (R2) (Equação 4), coeficiente de correlação (r) (Equação 5), índice de concordância proposto por Willmott (1981) (Equação 6) e índice de confiança proposto por Camargo e Sentelhas, (1996) (Equação 7) (BARNI et al., 2016).

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

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.

$$(2) \quad EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n}$$

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.

$$(3) \quad \%EF = 100x \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{O})^2} \right)$$

Onde:

EF%: percentual de eficiência;

E_i: valores estimados pelos interpoladores;

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

Ô: 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.

$$(4) \quad R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(p+1)} \right) (1 - R_p^2)$$

R_a²: coeficiente de determinação ajustado;

n: tamanho da amostra;

p: número de variáveis independentes; e

R_p²: coeficiente múltiplo de determinação

$$(5) \quad r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

r: coeficiente de correlação de Pearson e
x e *y*: valores da série observada e da série linear gerada,
 respectivamente.

$$(6) \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(E_i - O_i) + (O_i - \bar{O})]^2}$$

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
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).

$$(7) \quad c = r \times d$$

Onde:
 Em que,
c: índice de confiança ou desempenho (*c*);
r: coeficiente de correlação; e
d: índice de concordância

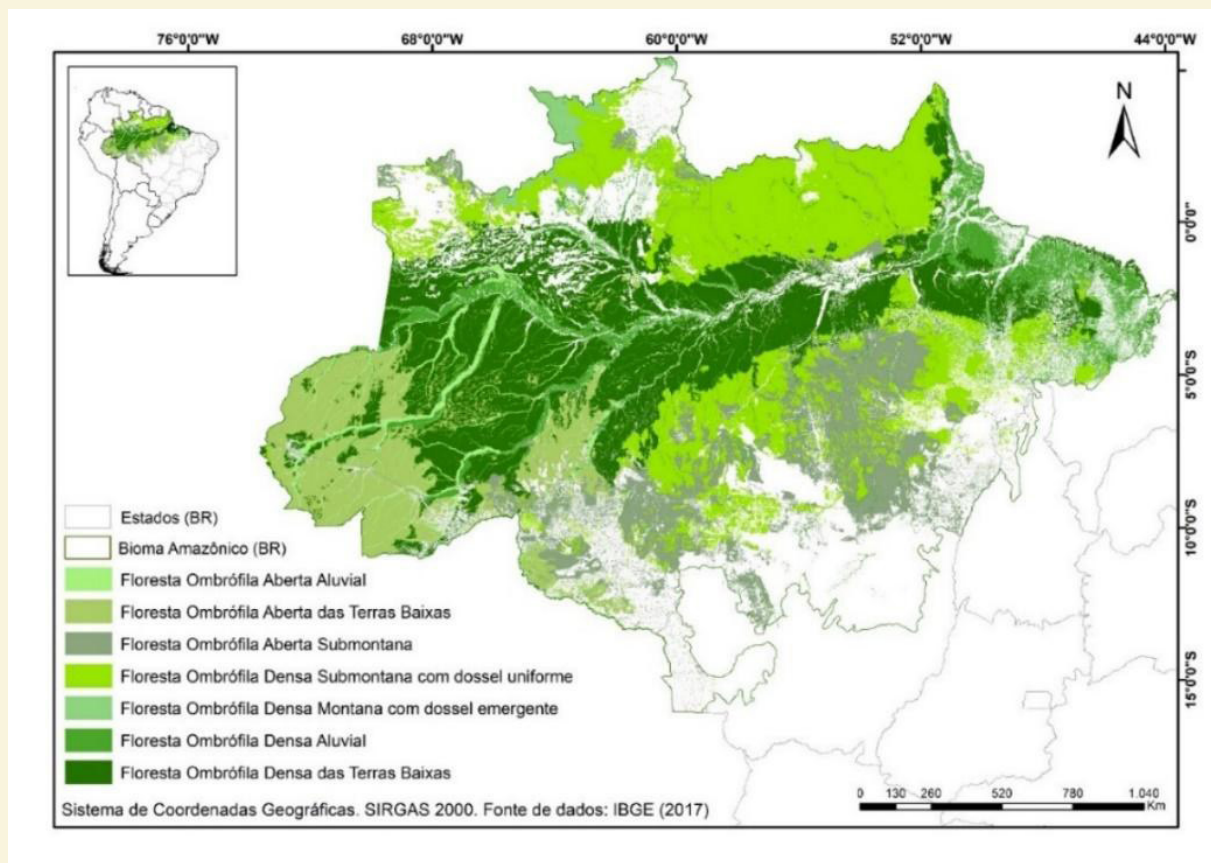
O teste indica que os valores variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita).

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.

4.2.1 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 2**, abaixo.

Figura 2. Distribuição das florestas ombrófilas densas e abertas no bioma Amazônia



Fonte: Os autores (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 ha⁻¹.

4.2.2 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 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).

$$(8) \quad \text{Potencial (MW/ano)} = \frac{[(mg \cdot 0,5) \cdot 2000 \text{ kcal kg}^{-1} \cdot 0,30]}{(860 \cdot 8.322)}$$

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.

4.3. LOCALIZAÇÃO ÓTIMA PARA INSTALAÇÃO DE TERMELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL NA AMAZÔNIA

Devido a extensão territorial dos estados do Pará e Amazonas, observou-se dificuldades no processamento de dados. Desse modo, optou-se por realizar os procedimentos metodológicos considerando as suas mesorregiões. Visando maior organização, 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).

4.3.1 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.

4.3.2 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, necessitaram de parâmetros de distância mínima para instalação de empreendimentos potencialmente poluidor nas proximidades, como vê-se na **Tabela 2**.

Tabela 2. Restrições consideradas na instalação de usinas termelétricas de base florestal no bioma Amazônia.

Feições	Restrições	Fonte
Aeródromos	Distância ≤ 20 km	CONAMA nº 4 de 1995
Terras indígenas	Polígono	-
Manguezais	Polígono	-
Assentamentos	Polígono	-
Corpos hídricos	Distância ≤ 200 m	Portaria MINTER nº 124 de 1980
Áreas urbanas	Polígono + Distância ≤ 1 km	IBGE (2018) + Sultana e Kumar (2012).
Ferrovias	Distância ≤ 30 m	Sultana e Kumar (2012).
Rodovias	Distância ≤ 30 m	Sultana e Kumar (2012).
Linhas de transmissão	Distância ≤ 30 m	Sultana e Kumar (2012).
UC* - Uso Sustentável	Polígono	-
UC - Proteção Integral	Polígono + Distância ≤ 10 km	CONAMA nº 13 de 1990

*Unidade de Conservação

Fonte: Os autores, 2023.

4.3.3 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 para 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.

4.3.4 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.

Com o volume de biomassa total em mãos, partiu-se então para o cálculo de madeira comercial. Para isso, utilizou-se o percentual de madeira comercial (5.82%) encontrado anteriormente - no estudo de Romeiro (2021). Para encontrar o potencial energético, também se utilizou a Fórmula 8.

4.3.5 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 a partir dos pontos de escoamento, 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).

05 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DIMENSIONAMENTO DA OFERTA DE BIOMASSA FLORESTAL NO BIOMA AMAZÔNIA

Por meio das análises dos modelos de krigagem obteve-se o volume de biomassa total acima do solo. Na Tabela 3, observa-se a distribuição dos valores encontrados na realização dos testes de krigagem para a verificação do melhor modelo de interpolação. Constatou que a Cokrigagem com as variáveis de vegetação classificada por fitofisionomia e precipitação apresentou os melhores resultados. Neste modelo, os valores de REQ_M, EQ_M, %EF foram menores, enquanto para os coeficientes Ra², 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.

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 km² 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.

Tabela 3. 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, R²aj = 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	0,59	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: Os autores (2023).

A estimativa da biomassa total acima do solo no bioma Amazônia, considerando a disponibilidade por fitofisionomia, observou que 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 Mg ha⁻¹) e Acre (214,2 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 Mg ha⁻¹ em uma área de 2.514.500 ha. A menor produtividade, foi derivada da Ombrófila Densa Aberta das Terras Baixas, com 350,6 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 ha.

Os dados de volume de biomassa total acima do solo obtidos pelos estados da Amazônia Ocidental estão dispostos na Tabela 4. Roraima apresentou a maior média considerando o bioma como um todo, 397,2 Mg ha⁻¹. A extensão de Roraima é de 224.301 km² 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.

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.

Tabela 4. 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: Os autores (2023).

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 5, 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 foram 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%

Tabela 5. 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
Omb. 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: Os autores (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 (FEARNSIDE 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 MapBiomias 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 Montanha 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).

5.2. POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL E SOB MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA

O potencial elétrico foi obtido empregando na Equação 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 6**. 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 corresponder apenas a 6%.

Tabela 6. 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: Os autores (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. Rondônia foi o segundo maior estado desse grupo, utilizando técnicas sustentáveis, geraria 1.118 MW/ano, destacou-se a vegetação Ombrófila Aberta Montana com 3.825 MW/ano. 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). Na Tabela 7, vê-se os dados de geração de energia obtidos pelos estados da Amazônia Oriental.

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 importantes 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).

Tabela 7. 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	Potencial Manejo	Potencial total	Potencial Manejo	Potencial total	Potencial Manejo	Potencial total	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: Os autores (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. O Amapá apresentou os maiores dados de biomassa acima do solo, juntamente com Roraima e ainda que tenha a menor área da Amazônia Oriental, 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).

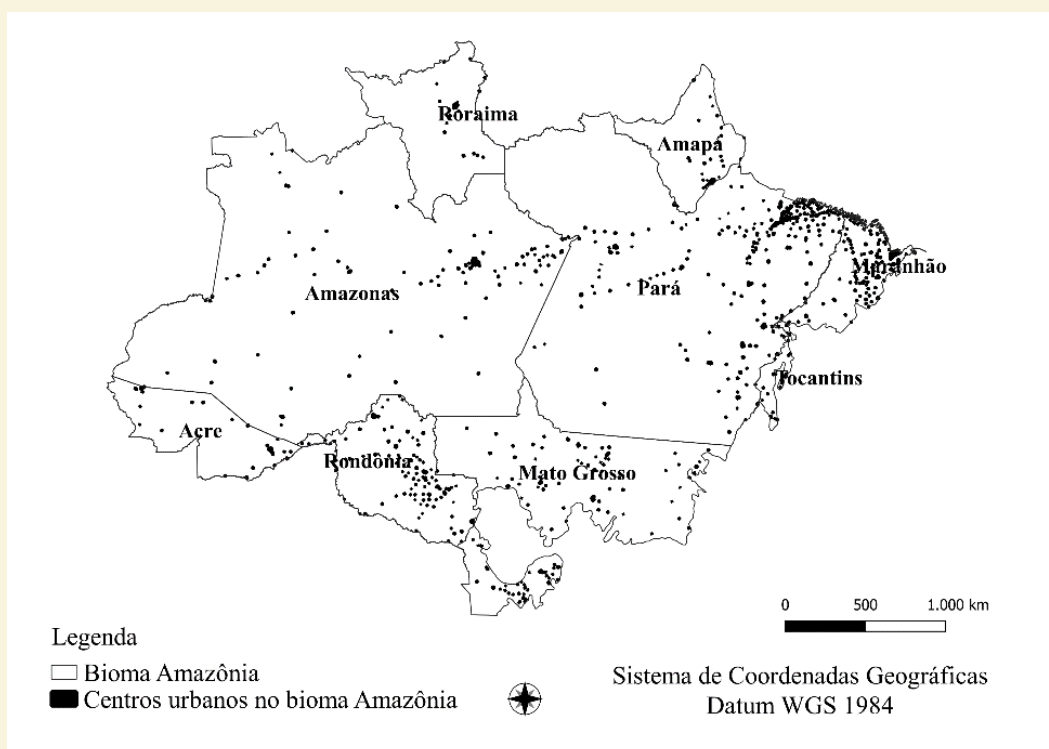
A porção do Tocantins situada na Amazônia não apresentou dados muito relevantes quando comparada aos demais estados. Observou-se que, sob manejo sustentável, seria produzido 21,25 MW/ano, a vegetação Ombrófila Densa Montana produziu os melhores resultados, com 43,3 MW/ano. O Tocantins detém 27 usinas 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.

5.3. LOCAIS APTOS PARA A INSTALAÇÃO DE TERMELÉTRICAS FLORESTAIS

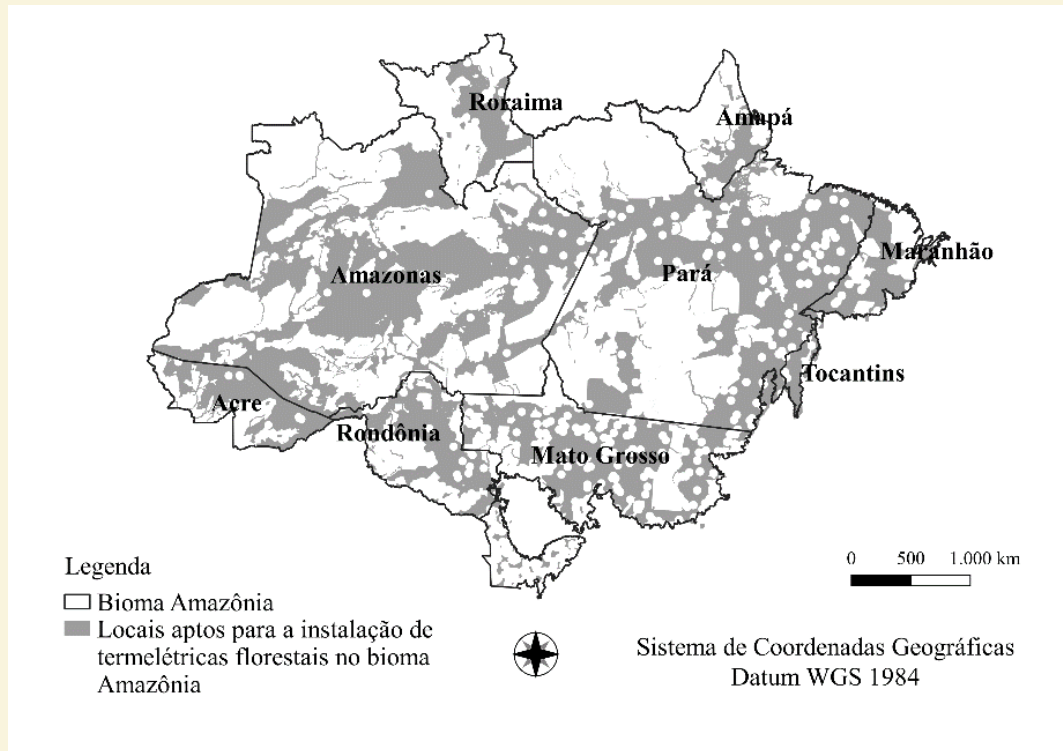
Quando se realiza uma análise de localização-alocação, nem todas as regiões podem ser consideradas. Desse modo, primeiramente, retira-se as áreas impróprias e por conseguinte, inicia-se o processamento de dados nas áreas potenciais. Isso permite a otimização do tempo de processamento e evita erros nos resultados (DONG, 2008; RAMOS, 2000; SULTANA e KUMAR, 2012). Nas **Figuras 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 3 (c), vê-se os pontos de biomassa gerados no bioma Amazônia, dentro do buffer de 50km.

Na **Tabela 8**, 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.

a)



b)



c)

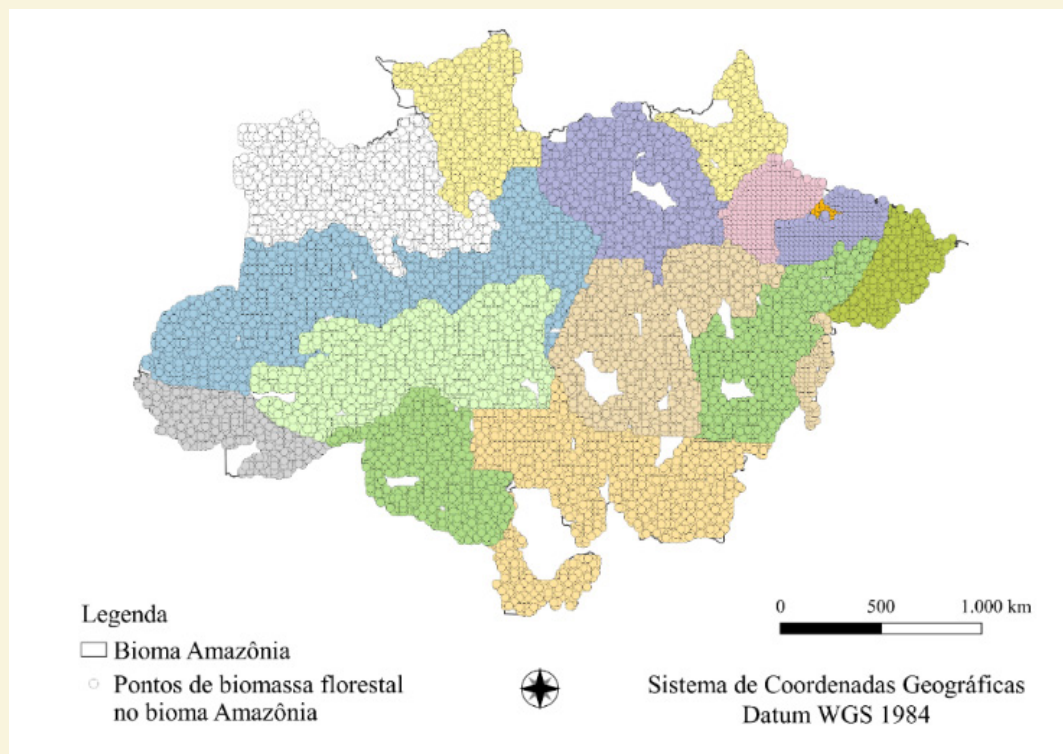


Figura 3. a) Pontos correspondentes aos centros urbanos no bioma Amazônia, sendo esses, todos candidatos à instalação de termelétricas florestais. **b)** Distribuição das localizações potenciais para instalação de termelétricas florestais no bioma Amazônia. **c)** Pontos de biomassa dispostos dentro 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: Os autores (2023).

Tabela 8. 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	Quant. UTE
		áreas potenciais	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	Quant. UTE
		áreas potenciais	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

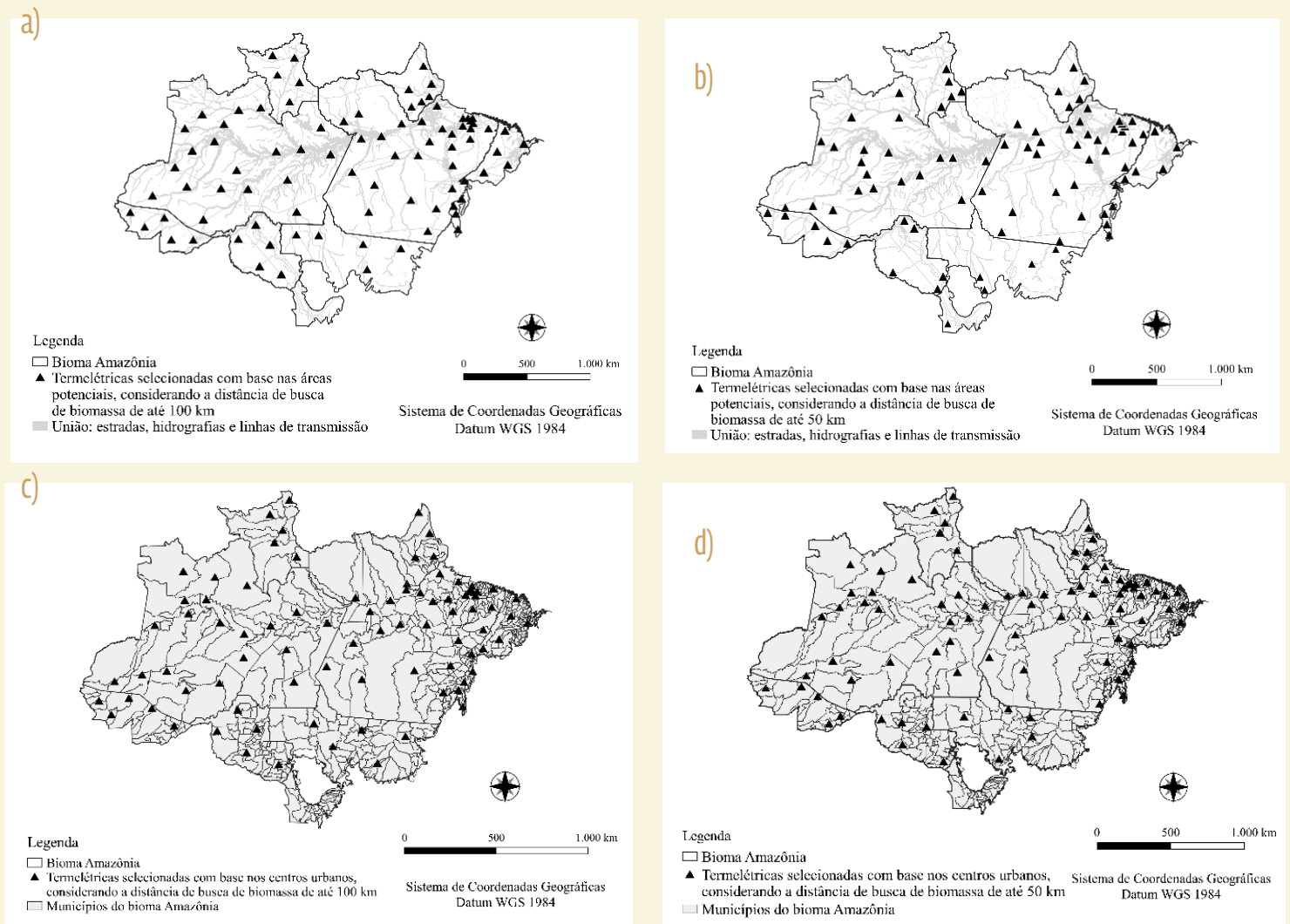
Fonte: Os autores (2023).

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).

A **Figura 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 4.a e 4.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 4.c e 4.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. 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: Os autores (2023).

A **Tabela 9**, 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.

Na **Tabela 10**, 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.

5.3.1. 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.

Tabela 9. 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: Os autores (2023).

Tabela 10. 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: Os autores (2023).

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, Caracará 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 (DA SILVA 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 (DA SILVA 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).

5.3.2. 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.

5.3.3. 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 Guaporé 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).

5.3.4. AMAZONAS

A **Tabela 11** 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. 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 abrangiu 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.

Tabela 11. 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																
UTE	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	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: Os autores (2023).

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 Itá, São Gabriel da Cachoeira, Japurá, Juruá, Tefé, Coari, Ipixuna, Envira, Pauini Tapauá, Nova Olinda do Norte, Apuí, Mauá, Manaquiri, Marabá e Autazes.

Para a distância de 100 Km, observou-se as seguintes localidades: São Gabriel da Cachoeira, Barcelos, Santa Isabel do Rio Negro, Japurá, Marabá, Amaturá, Fonte Boa, São Paulo de Olivença, Ipixuna, Boca do Acre, Juruá, Canutama, Tapauá, Coari, Codajás, Manicoré, Apuí, São Sebastião do Uatumã, Mauá e Careiro. Na Tabela 12 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, Marabá, 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, Marabá,

Jutaí, Coari, São Paulo de Olivença, Tefé, Ipixuna, Eirunepé, Pauini, Itamarati, Lábrea, Tapauá, Apuí, Novo Aripuanã, Mauá, Rio Preto da Eva e Anamá.

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).

Tabela 12. 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)	
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	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: Os autores (2023).

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 13 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.

Na Tabela 14 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.

5.3.5. 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.

Tabela 13. 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: Os autores (2023).

Tabela 14. 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: Os autores (2023).

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.

5.3.6. 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 trans-

porte 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).

5.3.7. 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 média superior nos centros urbanos para 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, Araganã, Serrano do Maranhão, Bacurituba e Conceição do Lago Açú. 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

5.3.8. 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 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).

5.3.9. PARÁ

As **Tabelas 15 e 16** 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. 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.

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, Inhamitanga 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 Portilho, Portel, Curralinho, Cametá, Moju, Goianésia do Pará, Santo Antônio do Tauá, Cachoeira do Arari, Viseu, Castanhal, Terra Alta.

Tabela 15. 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												
	Baixo Amazonas				Marajó				Metropolitana Belém			
	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	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: Os autores (2023).

Tabela 16. 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												
	Nordeste				Sudeste				Sudoeste			
	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	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: Os autores (2023).

As **Tabelas 17 e 18**, 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.

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, Trauateua, Santa Bárbara do Pará, Pau D'arco, Curionópolis e Mocajuba.

Tabela 17. 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: Os autores (2023).

Tabela 18. Geração de energia por ano – MW/ano – e tempo de funcionamento das usinas termelétricas situadas nas áreas urbanas – 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												
	Nordeste				Sudeste				Sudoeste			
	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	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: Os autores (2023).

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).

06 CONCLUSÃO

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. Este estudo trouxe 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa de produtividade em pesquisa nº 310871/2021-2, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), bolsa de mestrado acadêmico nº 046/2021.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração. 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZCO0YjllW-JlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQOLWVhN-GU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 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.

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.

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.

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.

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. 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 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. 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 decretos, etc. Presidência da República. Resolução CONAMA nº 013

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. 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 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 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 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 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 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 Mato Grosso. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/mt-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 Tocantins. Maio/2000. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/to-2000-pdf>. Acesso em abril 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. *Interciência*, 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.

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.

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.

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.

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.

de 06 de dezembro de 1990. Dispõe sobre normas referentes às atividades
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.

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.

desenvolvidas no entorno das Unidades de Conservação. Diário Oficial [da] República
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.

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

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.

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.

Federativa do Brasil. Brasília, DF: Casa Civil.

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

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.

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.

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

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.

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.

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.

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

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.

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

IMAZON. Estradas cortam ou se aproximam 41% da área de floresta na Amazônia, mostra mapeamento inédito. 2022. Disponível em: <https://imazon.org.br/imprensa/>

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

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapas de Bioma e Vegetação. 2004. Disponível em: [https:// biblioteca.ibge.gov.br/ visualizacao/mapas /GEBIS %20-% 20RJ /map 6083.jpg](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/mapas/GEBIS%20-%20RJ/map6083.jpg). Acesso em: 22 fev 2023.

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>. Acesso em abril de 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, INPE. Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. 2006. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: março 2023.

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.

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

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

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.

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

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.

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 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.

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://earthob->

servatory.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

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.

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

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. Portugal. 2000. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2000.

Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 – MME. São Paulo, 2009.

RAMOS, R. A. R. Localização industrial – Um modelo espacial para o Noroeste de 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. What is renewable energy importante?. 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/why-is-renewable-energy-important/>. Acesso em: 02 março de 2023.

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.

ROCHA, M. P. Técnicas e planejamento em serrarias. Ed. rev. ampl. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2002.121 p.

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.

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

- 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.
- 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, SEMA. 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 (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.
- SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440, 520-523. 2006.
- STEELE, P. H. Factors determining lumber recovery in sawmilling. Madison: US. Forest Service. 1984, 8 p. (General Technical Report. FPL, n. 39).
- 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.
- 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.
- TEIXEIRA, T. R. et al. Forest biomass power plant installation scenarios. *Biomass and Bioenergy*, v. 108, p. 35-47, 2018.
- 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.
- 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. Polos madeireiros do estado do Pará. *IMAZON*, Belém, p. 72, 2002.
- WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, v. 105, p. 83-95, 2017.
- WOORTMANN, C. P. I. B. Equações alométricas, estoque de biomassa e teores de carbono e nitrogênio de campinaranas da Amazônia central. 2010.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. Global Bioenergy Statistics. 2019.
- WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. Global Bioenergy Statistics. 2020.