

X PRÊMIO SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO

EM ESTUDOS DE ECONOMIA E MERCADO

FLORESTAL

TEMA

Metodologias para precificação de ativos florestais

EIXO TEMÁTICO

Eixo 2 – Estudo de viabilidade econômica da geração de energia por meio de biomassa

TÍTULO DO TRABALHO

**Metodologia territorial para valoração de resíduos florestais como ativos:
integração entre disponibilidade de biomassa, conversão energética,
substituição de diesel e créditos de carbono na Amazônia brasileira**

2026

Metodologia territorial para valoração de resíduos florestais como ativos: integração entre disponibilidade de biomassa, conversão energética, substituição de diesel e créditos de carbono na Amazônia brasileira

Resumo

A valoração de resíduos florestais na Amazônia esbarra em um problema metodológico recorrente: as dimensões física, energética, climática e econômica são tratadas em compartimentos separados, sem um caminho analítico que as conecte. Este artigo propõe uma metodologia territorial que articula essas quatro dimensões em uma única estrutura de precificação, aplicável a cadeias bioenergéticas descentralizadas. O percurso analítico parte da disponibilidade física da biomassa, passa pela conversão energética via gaseificação modular de leito fixo (unidades de 50 kW), incorpora o balanço climático da substituição de geradores a diesel e converte os resultados em valor anual por meio de dois operadores de precificação: custo evitado da geração fóssil e preço do Crédito de Descarbonização. A aplicação a um arranjo de oito municípios do norte de Mato Grosso e à FLONA Crepori (PA) identificou 28.573,56 t/ano de resíduos disponíveis, viabilizou um sistema de 23 unidades modulares com 1,15 MW instalados e 8.425,70 MWh/ano líquidos, e gerou saldo climático líquido de 5.411,12 tCO₂eq/ano evitadas, cerca de 5,4 vezes superior às emissões da própria cadeia. O valor anual do ativo foi estimado em R\$ 16.360.553,80, dominado pelo componente energético (97,9%), com variação de 21,6% entre cenários pessimista e otimista. A estrutura tem aplicação direta em instrumentos sob gestão do SFB, em especial na composição do Valor Mínimo Anual em editais de concessão, na priorização territorial do PAOF e na futura interface com o SBCE.

Palavras-chave: Ativos florestais. Biomassa residual. Precificação.

1 Introdução

A Amazônia brasileira concentra simultaneamente expressivos estoques de carbono florestal e importantes lacunas de acesso à energia elétrica confiável (DÜRR et al., 2026). Em comunidades isoladas e polos madeireiros distantes do Sistema Interligado Nacional, a geração elétrica permanece amplamente apoiada em geradores a diesel, com elevado custo

operacional, alta intensidade de emissões e dependência logística de combustível transportado por longas distâncias (GÓMEZ; SILVEIRA, 2015; SÁNCHEZ; TORRES; KALID, 2015). Esse arranjo contrasta com a presença contínua de biomassa lignocelulósica residual gerada por atividades madeireiras legais, concessões florestais e serrarias instaladas em torno de florestas nacionais e unidades de manejo sustentável.

A produção de madeira nativa na Amazônia gera resíduos ao longo de toda a cadeia produtiva. Galhadas, copas e fustes não comerciais permanecem associados às áreas de exploração sob manejo florestal sustentável, podendo representar volumes equivalentes ou superiores à madeira efetivamente processada (MOREIRA et al., 2025). Nas serrarias, costaneiras, refilos, cepilho e serragem se acumulam como subprodutos do processamento primário (SOTELI et al., 2024). Estima-se que o rendimento volumétrico médio das serrarias amazônicas se situe em torno de 40%, o que significa que aproximadamente 60% da matéria-prima processada converte-se em resíduo (SOTELI et al., 2024). Quando não destinados a usos energéticos ou industriais, esses materiais podem representar passivo ambiental e econômico em uma cadeia que poderia operar com maior aproveitamento produtivo.

Apesar desse potencial, a valoração de resíduos florestais e madeireiros ainda é tratada de forma fragmentada. Parte dos estudos concentra-se na disponibilidade física da biomassa, enquanto outros avaliam isoladamente a viabilidade técnica da gaseificação, o balanço de emissões evitadas pela substituição de diesel ou a monetização por créditos de descarbonização. Essa separação dificulta a formulação de uma metodologia capaz de tratar os resíduos simultaneamente como ativos físicos, energéticos, climáticos e econômicos (BRAGHIROLI; PASSARINI, 2020).

Neste artigo, resíduos florestais são compreendidos como ativos quando apresentam disponibilidade mensurável, localização definida, rastreabilidade, uso tecnológico possível e capacidade de gerar valor. O valor do ativo não depende apenas de sua massa ou volume, mas também de sua função em uma cadeia produtiva. Um mesmo resíduo pode assumir diferentes valores conforme sua distância até a unidade de conversão, sua qualidade físico-química, sua necessidade de pré-processamento, sua eficiência de conversão e sua capacidade de substituir fontes fósseis.

A bioeconomia de base florestal oferece o enquadramento conceitual para essa transição de resíduo para ativo. Cadeias produtivas baseadas em recursos florestais manejados

legalmente podem gerar valor econômico sem ampliar a pressão sobre a cobertura vegetal remanescente (DÜRR et al., 2026; LOPES; CHIAVARI, 2022). Nesse contexto, resíduos oriundos de manejo e processamento madeireiro representam encadeamento produtivo adicional sobre matéria-prima já mobilizada, com potencial de contribuir para geração local de energia, redução de emissões e diversificação de renda em territórios amazônicos (SOTELI et al., 2024, 2025).

Tecnicamente, a gaseificação de resíduos lignocelulósicos para geração elétrica vem sendo demonstrada em diferentes contextos. Estudos conduzidos em comunidades rurais da Índia mostram a viabilidade tecno-econômica de minigrids baseados em gaseificação de biomassa, especialmente em arranjos híbridos que combinam biomassa, solar fotovoltaico e backup convencional (CHAMBON et al., 2020). No Brasil, análises de modelos de negócio para gaseificação de biomassa residual em sistemas descentralizados indicam que o custo nivelado da eletricidade pode ser inferior ao da geração a diesel, sobretudo quando consideradas externalidades positivas como redução de emissões e benefícios sociais em comunidades isoladas (DESCLAUX; PEREIRA JÚNIOR, 2024).

Além da dimensão energética, a substituição da geração a diesel permite estimar um benefício climático líquido. Esse benefício corresponde à diferença entre as emissões evitadas no cenário fóssil e as emissões geradas pela cadeia bioenergética, incluindo transporte da biomassa, consumo auxiliar de energia e emissões de processo (MOREIRA et al., 2025). A monetização desse saldo pode ocorrer por meio de instrumentos de mercado regulado ou voluntário, desde que existam metodologias reconhecidas de certificação, monitoramento, relato e verificação. No Brasil, o Crédito de Descarbonização, instituído pela Política Nacional de Biocombustíveis, constitui referência relevante para a precificação de emissões evitadas (PEREIRA et al., 2025), embora sua aplicação a cadeias de biomassa sólida exija adaptações metodológicas e enfrente incertezas regulatórias persistentes (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022; FARRAPO JUNIOR et al., 2025).

A integridade da valoração climática depende de quantificação conservadora, fatores de emissão auditáveis e linhas de base consistentes. Estudos recentes sobre mercados de carbono indicam que falhas em adicionalidade, linhas de base e monitoramento podem comprometer a qualidade ambiental dos créditos emitidos (PROBST et al., 2024). Por isso, a valoração de

resíduos florestais como ativos climáticos deve distinguir claramente entre potencial indicativo de descarbonização e receita efetivamente certificada.

Diante desse quadro, este artigo propõe uma metodologia territorial para valoração de resíduos florestais como ativos em cadeias bioenergéticas descentralizadas na Amazônia brasileira. A abordagem articula quatro dimensões mensuráveis: disponibilidade física da biomassa, conversão energética, saldo climático e translação econômica por operadores de precificação. A pergunta norteadora é: como resíduos florestais e resíduos de serrarias podem ser valorados como ativos energéticos, climáticos e econômicos em cadeias bioenergéticas descentralizadas na Amazônia brasileira?

A metodologia é aplicada a um estudo de caso em oito municípios do norte de Mato Grosso, articulados à FLONA Crepori, no Pará. O sistema bioenergético de referência é composto por unidades modulares de gaseificação dimensionadas a partir da disponibilidade territorial de biomassa e da substituição de geração elétrica a diesel como cenário contrafactual. A contribuição central do artigo é oferecer uma estrutura replicável para apoiar a precificação de resíduos florestais como ativos, com potencial aplicação ao planejamento territorial, às concessões florestais, aos instrumentos de descarbonização e à bioeconomia de base florestal.

2 METODOLOGIA

2.1 Formulação geral da valoração territorial

A metodologia proposta organiza a valoração de resíduos florestais como ativos a partir de quatro dimensões integradas: física, energética, climática e econômica. O framework ilustrado na Figura 1 parte da identificação e quantificação territorial dos resíduos florestais (dimensão física), avança para o dimensionamento da rota bioenergética por meio da rota de gaseificação (dimensão energética), incorpora o balanço climático da cadeia substitutiva (dimensão climática) e finaliza com a translação econômica dos benefícios gerados com potencial monetização via CBIO (dimensão econômica). Dessa forma, o resíduo deixa de ser tratado apenas como fluxo físico disponível e passa a ser avaliado como ativo territorial com valor energético, climático e econômico potencial.

A valoração anual do ativo é expressa pela Equação 1:

$$V_{ativo} = (E_{ger} \times c_{die}) + (\Delta CO_2eq \times p_{CBIO}) \quad (1)$$

em que V_{ativo} é o valor anual do ativo bioenergético (R\$/ano), E_{ger} é a energia elétrica anual gerada pela cadeia bioenergética (MWh/ano), c_{die} é o custo unitário evitado da geração a diesel substituída (R\$/MWh), ΔCO_{2eq} é o saldo anual de emissões evitadas (tCO_{2eq}/ano) e p_{CBIO} é o preço unitário do Crédito de Descarbonização (R\$/tCO_{2eq}).



Figura 1. Framework metodológico para valoração territorial de resíduos florestais como ativos bioenergéticos e climáticos.

A primeira parcela representa o componente energético da valoração, associado ao custo evitado da geração fóssil. A segunda parcela representa o componente climático, associado à monetização potencial do saldo líquido de emissões evitadas. A aplicação da metodologia segue cinco etapas: caracterização territorial e quantificação da biomassa; dimensionamento do sistema de conversão energética; cálculo do balanço climático; translação econômica dos componentes energético e climático; e análise de sensibilidade dos principais parâmetros de mercado e emissão.

A demonstração metodológica foi conduzida em um arranjo territorial composto por oito municípios do norte de Mato Grosso e por uma área de manejo florestal sob concessão em Floresta Nacional no oeste do Pará. O estudo de caso tem função demonstrativa do procedimento de valoração, permitindo avaliar a transformação de resíduos florestais em ativos físicos, energéticos, climáticos e econômicos.

2.2 Caracterização territorial e disponibilidade física da biomassa

A caracterização territorial para o estudo de caso foi realizada a partir de um arranjo composto por oito municípios do norte de Mato Grosso, Sorriso, Sinop, Guarantã do Norte, Alta Floresta, Aripuanã, Juína, Juara e São José do Rio Claro (SOTELI et al., 2024, 2025), articulados a uma área de manejo florestal sustentável situada em Floresta Nacional no oeste do Pará. O recorte foi adotado por reunir disponibilidade documentada de resíduos de serraria, possibilidade de suprimento complementar por resíduos de manejo florestal e demanda potencial por soluções bioenergéticas descentralizadas.

Portando, foram considerados dois fluxos de biomassa residual. O primeiro corresponde aos resíduos de serraria, incluindo costaneiras, refilos, cepilho e serragem, destinados à rota de gaseificação. O segundo corresponde às galhadas oriundas do manejo florestal sustentável, destinadas à etapa térmica de secagem da biomassa. Essa separação funcional permitiu diferenciar os resíduos conforme sua origem, função tecnológica e contribuição para a valoração do ativo (BRAGHIROLI; PASSARINI, 2020).

A disponibilidade física dos resíduos de serraria foi estimada a partir dos volumes mensais de resíduo reportados por SOTELI et al. (2024, 2025) para cada um dos oito municípios do norte de Mato Grosso. Para a conversão dos volumes em base mássica, foram adotadas duas densidades distintas, em função da natureza física dos materiais. Os resíduos de serraria, compostos por mistura heterogênea e particulada de costaneiras, refilos, cepilho e serragem, foram convertidos pela densidade aparente de 400 kg/m^3 , representativa de resíduos lignocelulósicos a granel em condições típicas de manuseio e estocagem em serrarias. As galhadas oriundas do manejo florestal sustentável, que mantêm estrutura lenhosa praticamente íntegra, foram convertidas pela densidade básica de $619,22 \text{ kg/m}^3$, compatível com a faixa reportada para madeiras amazônicas comerciais (SOTELI et al., 2024). Essa diferenciação entre densidade aparente e densidade básica busca refletir a condição física

efetiva da biomassa em cada fluxo, evitando a superestimativa de massa que decorreria da adoção indistinta da densidade básica para resíduos a granel.

A localização do sistema bioenergético foi definida por critério de centralidade espacial. Foram calculadas distâncias geodésicas entre cada origem de biomassa e cada candidato a ponto de implantação, utilizando a fórmula de Haversine aplicada às coordenadas de latitude e longitude. Para cada candidato, obteve-se a soma das distâncias até todas as demais origens, e a alternativa com menor soma foi selecionada como ponto ótimo discreto. O resultado dessa seleção foi o município de Juara ($11,2558^{\circ}$ S; $57,5060^{\circ}$ O), adotado como nó logístico central para o cálculo das distâncias de transporte e das emissões associadas ao suprimento.

Como simplificação metodológica, foram utilizadas distâncias geodésicas em vez de rotas rodoviárias efetivas, e assumiu-se disponibilidade anual estável da biomassa no horizonte de operação analisado. Essas premissas são compatíveis com a função demonstrativa do estudo de caso, mas devem ser refinadas em aplicações futuras com dados logísticos primários, sazonalidade de suprimento e usos concorrentes da biomassa residual.

2.3 Conversão energética e geração elétrica

A conversão energética dos resíduos foi modelada por meio de gaseificação de leito fixo concorrente acoplada a motor de combustão interna, em arranjo modular de pequena escala. Essa rota foi adotada por sua compatibilidade com sistemas descentralizados e operação modular em pequena escala (CHAMBON et al., 2020), bem como pela adequação ao aproveitamento de resíduos lignocelulósicos quando há controle adequado de umidade, granulometria e composição (AKBARIAN et al., 2022; BRAGHIROLI; PASSARINI, 2020).

A unidade de referência adotada para a gaseificação corresponde ao módulo comercial Volter, sistema de cogeração instalado em contêiner que opera por gaseificação de leito fixo concorrente de cavacos de madeira acoplada a motor de combustão interna ciclo Otto. A unidade apresenta potência elétrica nominal de 50 kW e potência térmica nominal de 130 kW, com consumo nominal de biomassa de 47 kg/h em base operacional e regime anual de até 7.800 h/ano. O conjunto motor-gerador é composto por motor AGCO Sisu Power 8,4 L de seis cilindros turboalimentado e gerador síncrono de 55 kVA (400 V, 50 Hz), com automação ABB e possibilidade de controle remoto. A especificação técnica do fabricante estabelece teor de umidade inferior a 18% (base úmida) como condição operacional da

biomassa alimentada ao gaseificador (VOLTER, 2024). Esses parâmetros foram utilizados para dimensionar o número de unidades compatível com a disponibilidade anual de biomassa destinada à gaseificação.

O número de unidades modulares operáveis foi definido pela relação entre a disponibilidade anual de biomassa e a demanda anual de biomassa por unidade, conforme a Equação 2:

$$N = \frac{D_{bio}}{m_{bio} \times h_{op}} \quad (2)$$

em que N é o número de unidades modulares operáveis, D_{bio} é a disponibilidade anual de biomassa destinada à gaseificação (t/ano), m_{bio} é o consumo nominal de biomassa por unidade (t/h) e h_{op} é o regime operacional anual (h/ano). A quantidade definida de 23 unidades foi obtida considerando um fator de aproveitamento a biomassa efetivamente condicionada, de modo a preservar a margem operacional frente a perda de armazenamento e à variabilidade sazonal da oferta. Dessa forma, a demanda resultante correspondeu a 85% de biomassa condicionada disponível, configurando um dimensionamento conservador. A geração elétrica anual bruta foi calculada a partir do número de unidades, da potência elétrica nominal e do regime anual de operação, conforme a Equação 3:

$$E_{bruta} = N \times P_e \times h_{op} \quad (3)$$

em que E_{bruta} é a energia elétrica bruta gerada anualmente (MWh/ano), P_e é a potência elétrica nominal por unidade (MW) e os demais termos foram previamente definidos.

A biomassa destinada à gaseificação foi submetida à secagem antes da conversão energética, uma vez que o teor de umidade influencia a estabilidade do processo e a qualidade do gás de síntese, sendo a secagem reconhecida como primeiro estágio do processo de gaseificação (AKBARIAN et al., 2022). A umidade de referência para a alimentação do gaseificador foi adotada como 15% em base úmida, valor compatível com a especificação técnica do equipamento Volter, que estabelece teor inferior a 18% como condição operacional, e com a faixa recomendada na literatura para gaseificação estável de resíduos lignocelulósicos (AKBARIAN et al., 2022; BRAGHIROLI; PASSARINI, 2020). Para a condição de recebimento dos resíduos de serraria, foi adotado teor de umidade de 40% em base úmida, representativo de resíduos recém-processados em serrarias amazônicas (SOTELI

et al., 2024). O balanço de massa da secagem, considerando estas duas condições, foi estimado pela Equação 4.

$$m_{w,sec} \times (1 - MC_{in}) = m_{w,gas} \times (1 - MC_{out}) \quad (4)$$

em que $m_{w,sec}$ é a massa de biomassa úmida na entrada do secador (t/ano), $m_{w,gas}$ é a massa de biomassa úmida na entrada do gaseificador (t/ano), MC_{in} é a umidade da biomassa na entrada do secador, em base úmida, e MC_{out} é a umidade da biomassa na entrada do gaseificador, em base úmida.

O consumo elétrico dos secadores foi contabilizado como autoconsumo do próprio sistema bioenergético. Assim, a energia líquida disponível para substituição da geração a diesel foi calculada pela diferença entre a geração elétrica bruta e o consumo auxiliar do sistema, conforme a Equação 5:

$$E_{ger} = E_{bruta} - E_{aux} \quad (5)$$

em que E_{ger} é a energia elétrica líquida disponível para substituição da geração a diesel (MWh/ano) e E_{aux} é o consumo elétrico auxiliar associado ao pré-processamento da biomassa (MWh/ano).

O pré-processamento da biomassa foi realizado em secadores rotativos de modelo industrial, com vazão nominal de processamento de 500 kg/h em base seca por unidade e consumo elétrico auxiliar de 11 kW por equipamento, conforme especificação técnica do fabricante (BioBrax, 2025). O suprimento térmico para a secagem foi atendido pela queima direta de galhadas em fornalha acoplada, com consumo específico de 4 m³ a cada 10 h de operação por secador, equivalente a 0,4 m³/h. A conversão volumétrica para a base mássica utilizou a densidade básica de 619,22 kg/m³ adotada para as galhadas, conforme apresentado na seção 2.2. O número de secadores foi dimensionado para atender a demanda anual de biomassa condicionada para gaseificação..

A separação entre a rota de gaseificação, alimentada por resíduos de serraria, e a rota térmica de secagem, alimentada por galhadas, foi adotada para compatibilizar as características físicas dos resíduos com suas funções tecnológicas. Resíduos de serraria apresentam maior homogeneidade operacional para alimentação do gaseificador, enquanto galhadas heterogêneas foram direcionadas ao fornecimento de calor para a secagem.

2.4 Balanço climático da cadeia bioenergética

O balanço climático da cadeia bioenergética foi calculado a partir da diferença entre as emissões geradas pelas etapas operacionais do sistema e as emissões evitadas pela substituição da geração elétrica a diesel. A abordagem adotada considera o transporte da biomassa, o consumo auxiliar do sistema, as emissões de processo associadas à gaseificação e o cenário contrafactual de geração fóssil em sistema isolado.

As emissões geradas pela cadeia bioenergética foram estimadas conforme a Equação 6:

$$E_{cadeia} = E_{trans} + E_{aux} + E_{proc} \quad (6)$$

em que E_{cadeia} representa as emissões anuais da cadeia bioenergética (tCO₂eq/ano), E_{trans} corresponde às emissões de transporte da biomassa (tCO₂eq/ano), E_{aux} representa as emissões associadas ao consumo elétrico auxiliar (tCO₂eq/ano) e E_{proc} corresponde às emissões de processo da gaseificação (tCO₂eq/ano).

As emissões de transporte foram calculadas por abordagem tonelada-quilômetro, considerando a massa anual transportada, a distância entre cada origem de biomassa e o ponto de conversão, e o fator de emissão do transporte rodoviário, conforme a Equação 7:

$$E_{trans} = \sum(m_i \times d_i \times EF_{trans}) \quad (7)$$

em que m_i é a massa anual de biomassa transportada da origem i (t/ano), d_i é a distância de transporte entre a origem i e o ponto de conversão (km) e EF_{trans} é o fator de emissão do transporte rodoviário de carga (kgCO₂eq/t·km). O fator de emissão foi derivado a partir do consumo médio do veículo de 0,35 L/km (ABOL, 2020), do fator de emissão do diesel B12 brasileiro de 2,582 kgCO₂/L (BRASIL, 2019) e da carga útil representativa de 10 toneladas por viagem, considerando ciclo completo de operação com retorno vazio típico do transporte de biomassa em regiões amazônicas. Essa derivação resulta em $EF_{trans} = 0,18$ kgCO₂eq/t·km, compatível com a operação de caminhões de pequeno-médio porte em estradas com restrições logísticas regionais.

As emissões associadas ao consumo elétrico auxiliar foram tratadas de acordo com a origem da eletricidade utilizada. No sistema avaliado, o consumo dos secadores foi considerado como autoconsumo da própria geração bioenergética. Portanto, esse consumo reduz a energia líquida disponível para substituição da geração a diesel, mas não foi contabilizado como emissão adicional externa.

As emissões de processo foram representadas pelas emissões fugitivas de metano associadas à gaseificação, conforme a Equação 8:

$$E_{proc} = \frac{m_{bio,total} \times V_{gas} \times C_{CH4} \times GWP_{CH4}}{10^6} \quad (8)$$

em que $m_{bio,total}$ é a massa anual de biomassa gaseificada (t/ano), V_{gas} é a produção específica de gás de síntese (Nm³/kg de biomassa), C_{CH4} é a concentração de metano no gás de síntese (mg/Nm³) e GWP_{CH4} é o potencial de aquecimento global do metano em horizonte de 100 anos.

As emissões evitadas foram calculadas a partir da eletricidade líquida gerada pelo sistema bioenergético e do fator de emissão da geração a diesel no cenário contrafactual, conforme a Equação 9:

$$E_{evit} = E_{ger} \times EF_{die} \quad (9)$$

em que E_{evit} representa as emissões evitadas pela substituição da geração a diesel (tCO₂eq/ano), E_{ger} é a energia elétrica líquida disponível para substituição (MWh/ano) e EF_{die} é o fator de emissão da geração a diesel (kgCO₂eq/kWh). Adotou-se EF_{die} de 0,762 tCO₂/MWh, equivalente a 762 gCO₂eq/kWh, correspondente ao fator médio de emissão das termelétricas a diesel em operação nos sistemas isolados brasileiros (EPE, 2025). Esse fator é representativo do desempenho médio das termelétricas que atendem os sistemas isolados na Amazônia Legal e tem sido adotado em inventários oficiais e em estudos de descarbonização da geração descentralizada.

O saldo líquido de emissões evitadas foi calculado pela diferença entre as emissões evitadas e as emissões geradas pela cadeia bioenergética, conforme a Equação 10:

$$\Delta CO_{2eq} = E_{evit} - E_{cadeia} \quad (10)$$

em que ΔCO_{2eq} representa o saldo líquido anual de emissões evitadas (tCO₂eq/ano). Valores positivos indicam benefício climático líquido da substituição da geração a diesel pela cadeia bioenergética.

O CO₂ resultante da conversão termoquímica da biomassa, incluindo a oxidação do gás de síntese no motor de combustão interna, foi tratado como fluxo biogênico no balanço climático, sob a hipótese de manejo florestal regular, rastreabilidade da origem da biomassa e ausência de mudança de uso do solo induzida pela demanda bioenergética. Essa premissa segue a lógica aplicada em estudos de contabilização de carbono em florestas manejadas, nos quais a neutralidade climática depende da manutenção do ciclo de renovação da biomassa e da integridade do sistema de manejo (SIST et al., 2021).

2.5 Translação econômica e operadores de precificação

A translação econômica converte os resultados energético e climático em valor monetário anual do ativo. Para isso, foram considerados dois operadores de precificação: o custo evitado da geração a diesel, associado ao componente energético, e o preço unitário do Crédito de Descarbonização, associado ao componente climático. A soma desses dois componentes fornece o valor anual estimado do ativo, conforme a formulação geral apresentada na Equação 11.

O componente energético quantifica o benefício econômico anual associado à substituição da geração elétrica a diesel pela geração bioenergética, conforme a Equação 11:

$$V_{ener} = E_{ger} \times c_{die} \quad (11)$$

em que V_{ener} é o valor anual do componente energético (R\$/ano), E_{ger} é a energia elétrica líquida disponível para substituição da geração a diesel (MWh/ano) e c_{die} é o custo unitário evitado da geração a diesel substituída (R\$/MWh). Esse componente representa o valor econômico associado ao deslocamento do cenário fóssil de referência.

O componente climático quantifica o benefício econômico anual potencial associado à monetização do saldo líquido de emissões evitadas, conforme a Equação 12:

$$V_{clim} = \Delta CO_{2eq} \times p_{CBIO} \quad (12)$$

em que V_{clim} é o valor anual do componente climático (R\$/ano), ΔCO_{2eq} é o saldo líquido anual de emissões evitadas (tCO_{2eq}/ano), calculado conforme a Equação 9, e p_{CBIO} é o preço unitário do Crédito de Descarbonização (R\$/tCO_{2eq}).

A valoração anual agregada do ativo é obtida pela soma dos componentes energético e climático, conforme a Equação 13:

$$V_{ativo} = V_{ener} + V_{clim} \quad (13)$$

em que V_{ativo} é o valor anual total do ativo (R\$/ano). Essa decomposição permite identificar a contribuição relativa da substituição energética e da monetização climática para a valoração final. O preço do crédito de descarbonização foi tratado como parâmetro de cenário, e não como receita automaticamente garantida, representando dessa forma um potencial fator econômico associado à descarbonização.

Para o componente energético, o custo unitário evitado da geração a diesel (c_{die}) foi adotado como R\$ 1.900/MWh, valor correspondente ao ponto médio da faixa de R\$

1.500/MWh a R\$ 2.300/MWh observada para o Custo Variável Unitário (CVU) das termelétricas a diesel em operação nos sistemas isolados brasileiros, conforme o Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados, Ciclo 2023 (EPE, 2023). Essa faixa reflete o custo do combustível somado à complexidade logística de transporte para o interior da Amazônia Legal, atingindo os patamares superiores em localidades de difícil acesso, como as calhas dos rios no Amazonas e o noroeste de Mato Grosso. O valor adotado para o caso de referência representa, portanto, condição operacional intermediária dentro do conjunto de localidades atendidas pelo programa.

2.6 Tratamento da incerteza paramétrica

A incerteza paramétrica da valoração foi avaliada por meio de cenários discretos, construídos a partir da variação simultânea dos principais parâmetros que afetam o valor anual do ativo. Essa abordagem foi adotada para expressar a valoração em faixas plausíveis, em vez de restringir a análise a um único valor pontual.

Foram considerados dois parâmetros críticos: custo evitado da geração a diesel (c_{die}) e o preço unitário do Crédito de Descarbonização (p_{CBIO}). Para cada parâmetro foram definidos três níveis de análise, correspondentes aos cenários pessimista, central e otimista. O custo evitado do diesel foi variado em $\pm 10\%$ em torno do valor central de R\$ 1.900/MWh, resultando em R\$ 1.710/MWh no cenário pessimista e R\$ 2.090/MWh no cenário otimista. Essa amplitude está contida dentro da faixa de R\$ 1.500/MWh a R\$ 2.300/MWh reportada para os sistemas isolados brasileiros (CCEE, 2023), e representa subconjunto representativo das condições operacionais típicas, excluindo os patamares extremos associados às localidades de acesso mais restrito. O preço do Crédito de Descarbonização foi fixado em R\$ 35,00, R\$ 65,00 e R\$ 95,00 por tCO₂eq, faixa compatível com a variação observada no mercado brasileiro (B3, 2025).

Os cenários foram construídos pela combinação simultânea dos valores pessimistas, centrais e otimistas desses parâmetros. Assim, o cenário pessimista representa condições menos favoráveis de preço da energia e do crédito de carbono; o cenário central representa as premissas de referência; e o cenário otimista representa condições mais favoráveis à valoração do ativo.

A sensibilidade da metodologia foi avaliada pela amplitude entre os valores obtidos nos cenários pessimista e otimista, bem como pela comparação dessa amplitude com o valor central. Esse procedimento permite identificar a robustez da valoração frente a oscilações de mercado nos preços da energia substituída e do crédito de carbono.

As limitações desse tratamento decorrem da própria estrutura de cenários discretos. A abordagem não atribui probabilidades aos cenários, não incorpora correlações estatísticas entre parâmetros e não substitui análises probabilísticas mais completas. Aplicações futuras podem incorporar distribuições de probabilidade, simulações de Monte Carlo e análises de correlação entre variáveis técnicas, econômicas e climáticas.

3 Resultados

3.1 Base territorial e disponibilidade de biomassa adotadas no estudo

A base territorial utilizada neste estudo foi construída a partir de dados secundários de disponibilidade de biomassa residual, reunindo informações provenientes da literatura científica e de documentação técnica associada ao recorte espacial analisado. Portanto, os valores apresentados nesta seção não correspondem a um levantamento primário realizado pelos autores, mas ao conjunto de informações territoriais adotadas como base para a aplicação da metodologia de valoração proposta.

No caso dos resíduos de serraria, foram utilizados os quantitativos reportados para oito municípios do norte de Mato Grosso, Sorriso, Sinop, Guarantã do Norte, Alta Floresta, Aripuanã, Juína, Juara e São José do Rio Claro, conforme levantamentos publicados por SOTELI et al. sobre a geração e a classificação de resíduos do processamento primário da madeira na Amazônia brasileira e sua destinação para fins energéticos (SOTELI et al., 2024; SOTELI et al., 2025). Para os resíduos florestais de manejo, foi adotada a disponibilidade de galhadas associada à FLONA Crepori, no oeste do Pará, conforme a base documental incorporada ao presente estudo. Essa composição permitiu estruturar o arranjo territorial empregado na etapa de valoração.

A síntese espacial dessas fontes de biomassa é apresentada na **Tabela 1** e na **Figura 2**, que reúne a quantidade de resíduos, localização das serrarias consideradas no norte de Mato Grosso, a área de manejo florestal adotada na FLONA Crepori e o ponto de referência logístico em Juara. Assim, a figura não representa um mapeamento original produzido a partir

de inventário primário de campo, mas a organização espacial das fontes secundárias de biomassa utilizadas na modelagem.

Tabela 1. Base territorial detalhada por origem de biomassa: coordenadas geográficas, volume mensal de resíduo reportado, densidade adotada para conversão volumétrica, massa anual disponibilizada ao sistema e distância geodésica até o ponto de implantação em Juara.

Origem	Latitude (°)	Longitude (°)	RES (m ³ /mês)	Densidade (kg/m ³)	Massa anual (t/ano)	Distância até Juara (km)
Juara	-11,2558	-57,506	545,74	400	2619,552	0
Juína	-11,3728	-58,7489	620,67	400	2979,216	136,2
Alta Floresta	-9,875	-56,0864	427,52	400	2052,096	218,3
Sinop	-11,8606	-55,5091	211	400	1012,8	227,7
Sorriso	-12,542	-55,7211	227,1	400	1090,08	241,2
Aripuanã	-10,1684	-59,4565	602,59	400	2892,432	245
São José do Rio Claro	-13,4425	-56,7211	515,52	400	2474,496	257,6
Guarantã do Norte	-9,457	-54,8817	347,23	400	1666,704	349,9
Subtotal - resíduos de serraria			3497,37		16787,38	
FLONA Crepori (PA)	-6,5	-57,0018	1586,15	619,22	11786,11	531,7
Total					28573,49	

Distâncias geodésicas calculadas pela fórmula de Haversine. Densidades adotadas conforme a condição física do material: aparente para resíduos de serraria a granel (400 kg/m³); básica para madeira lenhosa íntegra das galhadas (619,22 kg/m³).

Com base nessas fontes, o estudo adotou disponibilidade anual total de 28.573,56 t/ano de biomassa residual, composta por 16.787,52 t/ano de resíduos de serraria e 11.786,04 t/ano de galhadas. Esses valores constituem a base física de entrada da metodologia e servem de referência para o dimensionamento do sistema bioenergético, o cálculo do balanço climático e a estimativa do valor anual do ativo.



Figura 2. Base territorial adotada no estudo, com a organização espacial das fontes secundárias de biomassa residual e sua convergência logística para Juara, no norte de Mato Grosso. Os marcadores indicam municípios com resíduos de serraria, a FLONA Crepori como fonte de resíduos de manejo florestal e o ponto de referência logístico adotado para a modelagem.

A adoção dessa base secundária é coerente com o objetivo do trabalho, que não consiste em rerepresentar um inventário territorial de biomassa, mas em demonstrar como disponibilidades já reportadas podem ser integradas a uma metodologia de valoração físico-energético-climática-econômica. Nesse sentido, a originalidade do artigo está na estrutura analítica aplicada aos dados, e não na geração primária dos quantitativos de biomassa.

3.2 Conversão energética e dimensionamento do sistema

A disponibilidade de biomassa adotada permitiu dimensionar um sistema bioenergético composto por 23 unidades modulares de gaseificação, cada uma com 50 kW de potência elétrica nominal. A configuração resultante totaliza 1,15 MW de capacidade instalada, operando em regime anual de 7.800 h/ano. Considerando as perdas internas do sistema, a

potência líquida por unidade foi assumida como 48 kW, resultando em 8.611,20 MWh/ano de eletricidade bruta disponível antes do desconto do autoconsumo dos secadores. Os principais parâmetros e resultados do dimensionamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Síntese dos parâmetros operacionais, fluxos de biomassa e resultados energéticos utilizados no dimensionamento do sistema bioenergético modular, incluindo secagem, gaseificação, autoconsumo e energia líquida disponível para substituição da geração a diesel.

Categoria	Parâmetro	Valor	Unidade
Configuração do sistema	Número de unidades modulares	23	unidades
Configuração do sistema	Potência elétrica nominal por unidade	50	kW
Configuração do sistema	Potência líquida assumida por unidade	48	kW
Configuração do sistema	Capacidade instalada total	1,15	MW
Operação anual	Regime de operação	7.800	h/ano
Geração elétrica	Eletricidade bruta antes do autoconsumo	8.611,20	MWh/ano
Secagem da biomassa	Umidade inicial da biomassa	40	% b.u.
Secagem da biomassa	Umidade final da biomassa	15	% b.u.
Secagem da biomassa	Resíduos de serraria na entrada do secador	14.053,00	t/ano
Secagem da biomassa	Biomassa condicionada para gaseificação	9.919,76	t/ano
Secagem da biomassa	Água removida na secagem	4.133,24	t/ano
Suporte térmico	Galhadas utilizadas para secagem	4.176,90	t/ano
Autoconsumo	Número de secadores	2	unidades
Autoconsumo	Potência elétrica por secador	11	kW
Autoconsumo	Consumo elétrico dos secadores	185,5	MWh/ano
Energia líquida	Energia disponível para substituição do diesel	8.425,70	MWh/ano

O pré-processamento da biomassa por secagem foi necessário para adequar os resíduos de serraria às condições operacionais da gaseificação. Os resíduos ingressam nos secadores com teor de umidade de 40% em base úmida e são reduzidos para 15% em base úmida antes da alimentação dos gaseificadores. Para essa etapa, foram consideradas 14.053,00 t/ano de resíduos de serraria na entrada do secador, resultando em 9.919,76 t/ano de biomassa condicionada para a gaseificação.

A secagem remove aproximadamente 4.133,24 t/ano de água da biomassa. O calor necessário para essa etapa é fornecido pela queima direta de 4.176,90 t/ano de galhadas oriundas da FLONA Crepori, fração equivalente a 35,4% da disponibilidade total reportada

de 11.786,04 t/ano. Essa separação funcional permite direcionar os resíduos de serraria, mais adequados à alimentação do gaseificador, para a rota de conversão elétrica, enquanto as galhadas são empregadas como suporte térmico ao condicionamento da biomassa.

O consumo elétrico dos dois secadores foi estimado em 185,50 MWh/ano, considerando 11 kW por secador. Esse consumo foi tratado como autoconsumo do próprio sistema bioenergético. Assim, a energia líquida disponível para substituição da geração a diesel corresponde à diferença entre a geração bruta e o consumo auxiliar da secagem, totalizando 8.425,70 MWh/ano.

Os resultados indicam que o sistema dimensionado converte a disponibilidade territorial de biomassa em uma oferta elétrica anual mensurável. Essa etapa representa a transição da dimensão física do ativo, expressa em massa de resíduos disponíveis, para sua dimensão energética, expressa em capacidade instalada e energia líquida substitutiva.

3.3 Balanço climático da cadeia bioenergética

O balanço climático da cadeia bioenergética foi determinado pela comparação entre as emissões geradas pelo sistema e as emissões evitadas pela substituição da geração elétrica a diesel. A decomposição dos componentes positivos e negativos do balanço climático é apresentada na **Figura 3**.

As emissões geradas totalizaram 1.009,26 tCO₂eq/ano, sendo praticamente dominadas pelo transporte da biomassa. O transporte dos resíduos de serraria contribuiu com 557,49 tCO₂eq/ano, enquanto o transporte das galhadas da FLONA Crepori contribuiu com 451,41 tCO₂eq/ano. Em conjunto, o transporte respondeu por 1.008,90 tCO₂eq/ano, equivalente a praticamente toda a carga climática positiva da cadeia.

As emissões fugitivas de metano associadas à gaseificação apresentaram contribuição muito reduzida, totalizando 0,36 tCO₂eq/ano. O consumo elétrico auxiliar dos secadores foi tratado como autoconsumo interno do sistema bioenergético e, portanto, não foi contabilizado como emissão externa adicional. Seu efeito foi incorporado pela redução da energia líquida disponível para substituição da geração a diesel.

As emissões evitadas pela substituição da geração diesel alcançaram 6.420,38 tCO₂eq/ano, calculadas a partir da energia líquida disponível de 8.425,70 MWh/ano e do fator de emissão

da geração diesel adotado no estudo, superando amplamente as emissões geradas pela cadeia de suprimento e conversão.

O saldo líquido resultante foi de 5.411,12 tCO₂eq/ano evitadas, indicando benefício climático positivo para a cadeia bioenergética. Esse saldo corresponde a uma mitigação aproximadamente 5,4 vezes superior às emissões geradas pela própria cadeia. Portanto, mesmo considerando o transporte da biomassa e as emissões de processo, o sistema apresentou desempenho climático favorável em razão da substituição da geração elétrica a diesel.

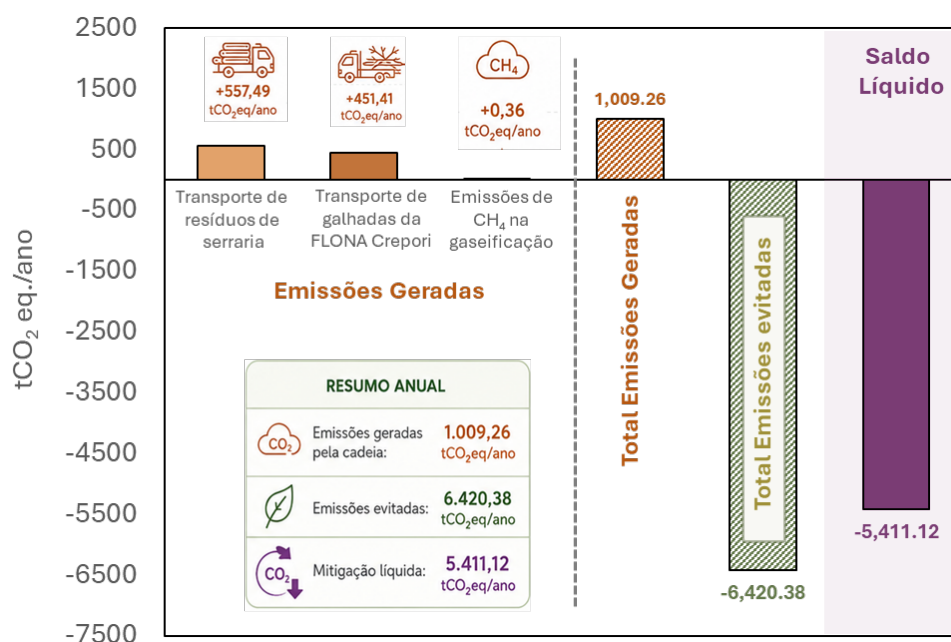


Figura 3. Balanço climático anual da cadeia bioenergética avaliada, considerando as emissões geradas pelo transporte dos resíduos de serraria, transporte das galhadas da FLONA Crepori e emissões fugitivas de CH₄ na gaseificação, em comparação com as emissões evitadas pela substituição da geração elétrica a diesel.

3.4 Valoração econômica do ativo

A valoração econômica anual do ativo foi obtida pela soma dos componentes energético e climático. O componente energético corresponde ao custo evitado da geração elétrica a diesel, enquanto o componente climático corresponde à monetização potencial do saldo líquido de emissões evitadas por meio do preço de referência do Crédito de Descarbonização.

O componente energético foi calculado a partir da energia líquida disponível de 8.425,70 MWh/ano e do custo unitário evitado de R\$ 1.900/MWh, adotado conforme a seção 2.5 como ponto médio da faixa reportada pela EPE para os sistemas isolados brasileiros (EPE, 2023). Esse componente atingiu R\$ 16.008.830,76/ano, representando a principal parcela do valor estimado para o ativo.

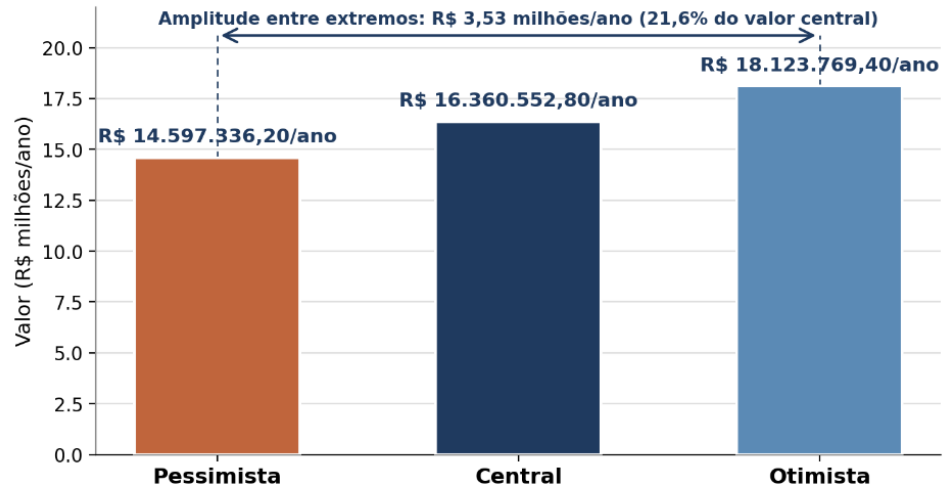
O componente climático foi calculado a partir do saldo líquido de 5.411,12 tCO₂eq/ano e do preço de referência de R\$ 65,00/tCO₂eq. Esse componente resultou em R\$ 351.723,04/ano. Esse valor deve ser interpretado como indicador econômico potencial associado à descarbonização, e não como receita certificada automaticamente.

A soma dos componentes resultou em valor anual total de R\$ 16.360.553,80/ano. A composição percentual evidencia a dominância do componente energético, responsável por 97,9% do valor total, enquanto o componente climático respondeu por 2,1%.

3.5 Análise de sensibilidade paramétrica

A análise de sensibilidade avaliou a variação do valor anual do ativo em três cenários: pessimista, central e otimista. Os cenários foram construídos a partir da variação simultânea dos dois principais parâmetros econômicos da metodologia: o custo evitado da geração a diesel e o preço do Crédito de Descarbonização.

No cenário central, o valor anual do ativo foi estimado em R\$ 16.360.553,80/ano. No cenário pessimista, esse valor foi reduzido para R\$ 14.597.336,20/ano, enquanto no cenário otimista alcançou R\$ 18.123.769,40/ano. A amplitude entre os extremos foi de R\$ 3.526.433,20, equivalente a 21,6% do valor central. A variação do valor anual do ativo nos cenários de sensibilidade é apresentada na **Figura 4**.



Custo evitado do diesel (R\$/MWh)	1.710	1.900	2.090
Preço do CBIO (R\$/tCO ₂ eq)	35	65	95

Figura 4. Variação do valor anual do ativo florestal residual nos cenários pessimista, central e otimista, com indicação do custo evitado do diesel e do preço do CBIO adotados em cada cenário.

Os resultados indicam que o valor anual do ativo permanece positivo e economicamente expressivo mesmo no cenário pessimista, sugerindo que a valoração é mais sensível aos parâmetros econômicos associados à substituição de diesel do que ao componente climático.

4 Discussão

4.1 Contribuições metodológicas

A principal contribuição do trabalho está na estruturação de uma metodologia territorial capaz de integrar dimensões que normalmente são avaliadas de forma separada: disponibilidade física da biomassa, conversão energética, balanço climático e translação econômica. Essa integração permite tratar resíduos florestais não apenas como subprodutos de baixo valor, mas como ativos territoriais cuja valoração depende de sua disponibilidade, localização, função tecnológica e capacidade de substituir geração fóssil.

A decomposição do valor anual em componentes energético e climático também contribui para a transparência da precificação. O componente energético representa o benefício associado à substituição da geração a diesel, enquanto o componente climático expressa o potencial de remuneração das emissões evitadas. Essa separação evita que a valoração seja

apresentada como um valor único sem rastreabilidade e permite identificar qual dimensão sustenta majoritariamente o valor estimado.

A metodologia também avança ao explicitar que a precificação do ativo depende de operadores institucionais de transação. A biomassa residual possui valor físico, energético e climático mensurável, mas a realização econômica desse valor depende de mecanismos capazes de remunerar a energia substitutiva e o benefício climático.

4.2 Aplicabilidade para instrumentos de gestão florestal pública

A metodologia apresenta aplicação potencial para instrumentos de gestão florestal pública, especialmente no planejamento de Unidades de Manejo Florestal, na formulação de editais de concessão e na estruturação de mecanismos de repartição de benefícios associados ao aproveitamento de resíduos. Ao quantificar o valor energético e climático de fluxos residuais, o método permite incorporar a biomassa residual como componente adicional na análise territorial de áreas sob manejo.

Em concessões florestais, a metodologia pode subsidiar cláusulas voltadas ao aproveitamento energético de resíduos, desde que compatíveis com os planos de manejo, com a logística local e com a capacidade de monitoramento (MURAKAMI LIMA; AZEVEDO-RAMOS, 2023). A quantificação do valor anual do ativo pode apoiar a definição de metas realistas de conversão energética, critérios de uso de resíduos e mecanismos de compartilhamento de benefícios entre concessionários, poder concedente e comunidades locais.

No planejamento territorial, a abordagem permite comparar diferentes arranjos de suprimento e conversão. Territórios com maior disponibilidade de resíduos, menor penalidade logística e demanda energética local mais próxima tendem a apresentar maior potencial de valoração. Essa leitura pode auxiliar na priorização de áreas para estudos mais detalhados, incluindo análises com rotas rodoviárias reais, dados primários de disponibilidade e avaliação econômica completa.

A metodologia oferece subsídio direto a instrumentos institucionais sob gestão do Serviço Florestal Brasileiro. No âmbito do Plano Anual de Outorga Florestal (PAOF), a quantificação do valor anual associado ao aproveitamento de resíduos pode compor a justificativa econômica de inclusão de áreas no calendário de licitação, qualificando a priorização

territorial com base em parâmetros energéticos e climáticos mensuráveis. Na formulação de editais de concessão florestal, o valor estimado do ativo residual pode ser incorporado como componente complementar à valoração da madeira em pé no cálculo do Valor Mínimo Anual (VMA), contribuindo para precificação mais aderente à realidade produtiva da unidade de manejo. Em planos de manejo florestal sustentável, a metodologia pode orientar metas operacionais de aproveitamento de resíduos e critérios de monitoramento da destinação da biomassa. Com a regulamentação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024 (BRASIL, 2024), o componente climático ora tratado como indicador potencial pode evoluir para receita certificada, ampliando a aderência da metodologia ao arcabouço regulatório brasileiro emergente e fortalecendo o papel das concessões florestais federais como instrumento de descarbonização.

A realização econômica do valor estimado depende da existência de mecanismos institucionais capazes de remunerar os benefícios energético e climático. Em cenários nos quais esses mecanismos não estejam operantes, a metodologia ainda fornece informação física, energética e climática consistente, mas a dimensão econômica do ativo permanece potencial.

4.3 Limitações e extensões

A primeira limitação está relacionada à base de dados adotada que deve ser interpretada como aplicação metodológica sobre uma base territorial previamente reportada, e não como inventário original de resíduos florestais. A disponibilidade de resíduos de serraria foi estruturada a partir de dados da literatura e os dados dos resíduos de manejo sustentável de informações documentais do SFB, não de um novo levantamento primário realizado especificamente para este artigo.

Outra limitação refere-se ao uso de distâncias geodésicas que não substitui rotas rodoviárias efetivas, condições de tráfego, sazonalidade, custos de transporte e restrições de acesso. Aplicações futuras devem incorporar malha viária real e dados logísticos primários para refinar o balanço climático e a valoração econômica.

A análise econômica do estudo estima o valor anual do ativo com base no custo evitado da geração a diesel e no valor potencial das emissões evitadas, mas não realiza avaliação

financeira completa. Estudos futuros devem explorar o investimento inicial, custos operacionais, manutenção, estrutura de capital, tarifa efetiva de venda de energia, payback e LCOE que avaliarão a viabilidade real de implantação.

Em relação a dimensão de monetização climática, é preciso ressaltar que essa foi tratada como indicador econômico potencial, e não como receita certificada. A emissão efetiva de créditos depende de metodologia reconhecida, certificação, adicionalidade, monitoramento, relato, verificação e compatibilidade regulatória. Essa cautela é especialmente importante para evitar dupla contagem e para preservar a integridade ambiental da valoração.

Extensões futuras podem incluir análise probabilística de incerteza, simulação de rotas logísticas reais, expansão para outras FLONAs e polos madeireiros, incorporação de coprodutos e avaliação de diferentes modelos institucionais de operação. A inclusão de CAPEX, OPEX e indicadores financeiros permitiria transformar a valoração anual aqui proposta em uma análise de viabilidade econômica completa.

5 Conclusões

Este trabalho desenvolveu uma metodologia territorial para valorar resíduos florestais como ativos em cadeias bioenergéticas descentralizadas na Amazônia brasileira. A abordagem integra disponibilidade física de biomassa, conversão energética por gaseificação, balanço climático da substituição de diesel e translação econômica por operadores de precificação, permitindo estimar o valor anual do ativo a partir de dimensões físicas, energéticas, climáticas e econômicas.

A aplicação ao estudo de caso demonstrou que uma base territorial construída a partir de dados secundários de resíduos de serrarias e galhadas de manejo florestal pode sustentar uma configuração bioenergética de 23 unidades modulares, com 1,15 MW de capacidade instalada e 8.425,70 MWh/ano de energia líquida disponível após autoconsumo. O balanço climático indicou saldo líquido de 5.411,12 tCO₂eq/ano evitadas, evidenciando o papel da substituição da geração a diesel como principal fonte de mitigação.

A valoração econômica estimou valor anual de R\$ 16.360.553,80, composto majoritariamente pelo componente energético associado ao custo evitado de diesel. O componente climático, embora proporcionalmente menor, adiciona uma dimensão complementar de valor ao reconhecer o potencial econômico das emissões evitadas. A análise

de sensibilidade indicou que o valor do ativo permaneceu positivo nos cenários avaliados, reforçando a consistência da metodologia frente a variações nos principais parâmetros de mercado e emissão. A metodologia pode subsidiar instrumentos de gestão florestal pública, especialmente no planejamento territorial de resíduos, sejam de serrarias ou de manejo sustentável, na avaliação de oportunidades em concessões florestais e na estruturação de mecanismos de monetização do aproveitamento energético e climático da biomassa residual. Contudo, a realização econômica dos valores estimados depende de mecanismos institucionais capazes de remunerar os benefícios energético e climático.

Como limitação, o estudo não constitui inventário primário de biomassa, nem avaliação financeira completa. A disponibilidade de resíduos foi adotada a partir de bases secundárias, e a análise não incorporou CAPEX, OPEX, payback, LCOE, rotas rodoviárias reais ou certificação efetiva de créditos de carbono. Estudos futuros devem incorporar dados primários, logística detalhada, análise financeira completa e avaliação regulatória dos mecanismos de monetização climática.

REFERÊNCIAS

ABOL — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE OPERADORES LOGÍSTICOS. Novos caminhões inteligentes rodam mais e poluem menos. São Paulo: ABOL, 2020. Disponível em: <https://abolbrasil.org.br/noticias/noticias/novos-caminhoes-inteligentes-rodam-mais-e-poluem-menos>.

AKBARIAN, A.; ANDOOZ, A.; KOWSARI, E.; RAMAKRISHNA, S.; ASGARI, S.; ANSARI CHESHMEH, Z. Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, v. 362, art. 127774, 2022. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127774.

BIOBRAX. Secador rotativo. Cascavel, PR, [2025]. Disponível em: <https://biobrax.com.br/secadores/secador-rotativo/>.

B3 – BRASIL, BOLSA, BALCÃO. Índice de Crédito de Descarbonização B3 (ICBIO B3). São Paulo: B3, 2025. Disponível em: <https://www.b3.com.br>.

BRAGHIROLI, F.L.; PASSARINI, L. Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities. *Current Forestry Reports*, v. 6, n. 2, p. 172-183, 2020. DOI: 10.1007/s40725-020-00112-9.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/15042.htm.

BRASIL — Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Fatores de emissão de gases de efeito estufa do setor de energia. Brasília, DF: MCTIC, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Conta de Consumo de Combustíveis: custo total de geração por usina (CCC-CTG). [S. l.]: CCEE, 2023. Disponível em: https://dadosabertos.ccee.org.br/dataset/ccc_ctg_usina.

CHAMBON, C.L.; KARIA, T.; SANDWELL, P.; HALLETT, J.P. Techno-economic assessment of biomass gasification-based mini-grids for productive energy applications: the case of rural India. *Renewable Energy*, v. 154, p. 432-444, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.002.

DESCLAUX, L.; PEREIRA JÚNIOR, A.O. Residual biomass gasification for small-scale decentralized electricity production: business models for lower societal costs. *Energies*, v. 17, n. 8, art. 1868, 2024. DOI: 10.3390/en17081868.

DÜRR, J.; RIBEIRO, S. M. C.; VARGAS, D.; SELLARE, J.; BÖRNER, J. Forest-based Amazonian bioeconomies: new opportunities and old challenges. In: ZILBERMAN, D.; ZHUANG, J.; WESSELER, J.; KHANNA, M. (ed.). Handbook of Circular Bioeconomy. Cham: Springer, 2026. p. 583-603. (Natural Resource Management and Policy, v. 61). DOI: 10.1007/978-3-032-07112-5_27.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados – Ciclo 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>.

FARRAPO JUNIOR, A.C.; VÁSQUEZ-IBARRA, L.; REBOLLEDO-LEIVA, R.; SILVA, D.A.L. BioCalc: a novel life cycle-based tool for quantifying the carbon credits of solid biofuels in Brazil. Biomass and Bioenergy, v. 203, art. 108334, 2025. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108334.

GÓMEZ, M.F.; SILVEIRA, S. The last mile in the Brazilian Amazon – a potential pathway for universal electricity access. Energy Policy, v. 82, p. 23-37, 2015. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.02.018.

GRANGEIA, C.; SANTOS, L.; LAZARO, L.L.B. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: an assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. Energy Conversion and Management: X, v. 13, art. 100156, 2022. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100156.

LOPES, Cristina Leme; CHIAVARI, Joana. Bioeconomia na Amazônia: análise conceitual, regulatória e institucional. Rio de Janeiro: Amazônia 2030; Climate Policy Initiative/PUC-Rio, 2022. Disponível em: <https://amazonia2030.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Bioeconomia-na-Amazonia-1.pdf>.

MOREIRA, M.G. et al. Assessment of wood residue blends from the Amazon region for decentralized energy recovery and decarbonization: combustion kinetics, thermodynamics and potential emissions. Biomass

and Bioenergy, v. 197, art. 107827, 2025. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.107827.

MURAKAMI LIMA, R.Y.; AZEVEDO-RAMOS, C. Environmental management assessment in state forest concessions in the Brazilian Amazon. *Environmental Science & Policy*, v. 148, art. 103547, 2023. DOI: 10.1016/j.envsci.2023.07.007.

PEREIRA, L.G. et al. RenovaCalc: calculation of carbon intensities under Brazil's National Biofuel Policy. *Sustainability*, v. 17, n. 23, art. 10442, 2025. DOI: 10.3390/su172310442.

PROBST, B.S.; TOETZKE, M.; KONTOLEON, A.; DÍAZ ANADÓN, L.; MINX, J.C.; HAYA, B.K.; SCHNEIDER, L.; TROTTER, P.A.; WEST, T.A.P.; GILL-WIEHL, A.; HOFFMANN, V.H. Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nature Communications*, v. 15, art. 9562, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-53645-z.

SÁNCHEZ, A.S.; TORRES, E.A.; KALID, R.A. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 278-290, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.075.

SIST, P.; PIPONIOT, C.; KANASHIRO, M.; PENA-CLAROS, M.; PUTZ, F.E.; SCHULZE, M.; VERISSIMO, A.; VIDAL, E. Sustainability of Brazilian forest concessions. *Forest Ecology and Management*, v. 496, art. 119440, 2021. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119440.

SOTELI, R.P.; OLIVEIRA RODRIGUES, L.D. de; PEREIRA, B.L.C.; PROTÁSIO, T.P. de; CARNEIRO, A.C.O. de; OLIVEIRA, A.C. Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes. *Environment, Development and Sustainability*, v. 26, p. 14065-14094, 2024. DOI: 10.1007/s10668-023-03179-z.

SOTELI, R.P.; MASCARENHAS, A.R.P.; PROTÁSIO, T.P. de; CARVALHO, A.M.M.L.; ROCHA, K.J. da; PEREIRA, B.L.C.; OLIVEIRA, A.C. Valorization and grouping of wood waste from sawmills in Amazonia for bioenergy. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 32, p. 18745-18762, 2025. DOI: 10.1007/s11356-025-36781-x.

VOLTER. Volter products. [ca. 2024]. Disponível em: <https://volter.fi/en/volter-products/>. Acesso em: 14 abr. 2026.