ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA: TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM BIOCARVÃO

Fundamentos, tecnologias e perspectivas para o desenvolvimento sustentável



Bruno Kleidson da Silva Maia
Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Kalwan Maciel Martins de Jesus

Wissen
2026

ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA: TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM BIOCARVÃO

Fundamentos, tecnologias e perspectivas para o desenvolvimento sustentável



Bruno Kleidson da Silva Maia
Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Kalwan Maciel Martins de Jesus

Wissen
2026

Bruno Kleidson da Silva Maia
Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Kalwan Maciel Martins de Jesus

ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA: TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM BIOCARVÃO

Fundamentos, tecnologias e perspectivas para o desenvolvimento sustentável

Teresina-PI
2026
Wissen Editora, 2026 | ISBN 978-65-6219-017-5 | DOI: 10.52832/wed.222

©2026 *by* Wissen Editora
Copyright © Wissen Editora
Copyright do texto © 2026 Os autores
Copyright da edição © Wissen Editora
Todos os direitos reservados

Direitos para esta edição cedidos pelos autores à Wissen Editora.

Todo o conteúdo desta obra, inclusive correção ortográfica e gramatical, é de responsabilidade do(s) autor(es). A obra de acesso aberto (Open Access) está protegida por Lei, sob Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial-Sem Derivações 4.0 Internacional, sendo permitido seu *download* e compartilhamento, desde que atribuído o crédito aos autores, sem alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Editores Chefe: Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Projeto Gráfico e Diagramação: Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

Imagem da Capa: Canva

Edição de Arte: Junielson Soares da Silva

Revisão: Os autores
A Organizadora

Informações sobre a Editora
Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina – Piauí, Brasil
E-mails: wisseneditora@gmail.com

Siga nossas redes sociais:
@wisseneditora

Wissen Editora, 2026 | ISBN 978-65-6219-017-5 | DOI: 10.52832/wed.222

EQUIPE EDITORIAL

Editores-chefes

Dr. Junielson Soares da Silva
Ma. Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira
Dra. Denise dos Santos Vila Verde
Dra. Adriana de Sousa Lima

Equipe de arte e editoração

Neyla Cristiane Rodrigues de Oliveira

CONSELHO EDITORIAL

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Dr. Felipe Górski - Secretaria de Educação do Paraná (SEED/PR)
Dra. Patrícia Pato dos Santos - Universidade Anhanguera (Uniderp)
Dr. Jose Carlos Guimaraes Junior - Governo do Distrito Federal (DF)

Ciências Biológicas e da Saúde

Dra. Francijara Araújo da Silva - Centro Universitário do Norte (Uninorte)
Dra. Rita di Cássia de Oliveira Angelo - Universidade de Pernambuco (UPE)
Dra. Ana Isabelle de Gois Queiroz - Centro Universitário Ateneu (UniAteneu)

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Dr. Allan Douglas Bento da Costa - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)
Dra. Vania Ribeiro Ferreira - Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)
Dr. Agmar José de Jesus Silva – Secretaria de Educação do Amazonas (Seduc/AM)

Linguística, Letras e Artes

Dra. Conceição Maria Alves de A. Guisardi - Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Dr. Danni Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Dr. Isael de Jesus Sena - Culture, Education, Formation, Travail (CIRCEFT)
Dra. Mareli Eliane Graupe - Universidade do Planalto Catarinense (Uniplac)
Dr. Rodrigo Avila Colla - Rede Municipal de Ensino de Esteio, RS
Dr. Erika Giacometti Rocha Berribili - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Dr. Douglas Manoel Antonio De Abreu P. Dos Santos - Universidade de São Paulo (USP)
Dra. Aline Luiza de Carvalho - Fundação Hospitalar do Estado de Minas Gerais (FHEMIG)
Dr. José Luiz Esteves - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC/PR)
Dr. Claudemir Ramos - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC/SP)
Dr. Daniela Conegatti Batista – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Dr. Wilson de Lima Brito Filho - Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Dr. Cleonice Pereira do Nascimento Bittencourt- Universidade de Brasília (UnB)
Dr. Jonata Ferreira de Moura - Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Dra. Renata dos Santos - Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Wissen Editora, 2026 | ISBN 978-65-6219-017-5 | DOI: 10.52832/wed.222

Conselho Técnico Científico

Me. Anderson de Souza Gallo - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ
Ma. Antônia Alikaene de Sá - Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Ma. Talita Benedcta Santos Künast - Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Ma. Irene Suelen de Araújo Gomes – Secretaria de Educação do Ceará (Seduc /CE)
Ma. Tamires Oliveira Gomes - Universidade Federal de São Paulo (Unifesp)
Ma. Aline Rocha Rodrigues - União Das Instituições De Serviços, Ensino E Pesquisa LTDA (UNISEPE)
Me. Mauricio Pavone Rodrigues - Universidade Cidade de São Paulo (Unicid)
Esp. Rubens Barbosa Rezende – Faculdade UniFB
Me. Luciano Cabral Rios – Secretaria de Educação do Piauí (Seduc/PI)
Me. Jhenys Maiker Santos - Universidade Federal do Piauí (UFPI0
Dr. Francisco de Paula S. de Araujo Junior – Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Ma. Anna Karla Barros da Trindade - Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Ma. Elaine Fernanda dos Santos - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Ma. Lilian Regina Araújo dos Santos - Universidade do Grande Rio (Unigranrio)
Ma. Luziane Said Cometti Lélis - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Ma. Márcia Antônia Dias Catunda - Devry Brasil
Ma. Marcia Rebeca de Oliveira - Instituto Federal da Bahia (IFBA)
Ma. Mariana Morais Azevedo - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Ma. Marlova Giuliani Garcia - Instituto Federal Farroupilha (IFFar)
Ma. Rosana Maria dos Santos - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Ma. Rosana Wichineski de Lara de Souza - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Ma. Simone Ferreira Angelo - Escola Família Agrícola de Belo Monte - MG
Ma. Suzel Lima da Silva - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Ma. Tatiana Seixas Machado Carpenter - Escola Parque
Me. Cássio Joaquim Gomes - Instituto Federal de Nova Andradina / Escola E. Manuel Romão
Me. Daniel Ordane da Costa Vale - Secretaria Municipal de Educação de Contagem
Me. Diego dos Santos Verri - Secretária da Educação do Rio Grande do Sul
Me. Fernando Gagno Júnior - SEMED - Guarapari/ES
Me. Grégory Alves Dionor - Universidade do Estado da Bahia (UNEB)/ Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Me. Lucas Pereira Gandra - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); UNOPAR, Polo Coxim/MS
Me. Lucas Peres Guimarães – Secretaria Municipal de Educação de Barra Mansa - RJ
Me. Luiz Otavio Rodrigues Mendes - Universidade Estadual de Maringá (UEM)
Me. Mateus de Souza Duarte - Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Me. Milton Carvalho de Sousa Junior - Instituto Federal do Amazonas (IFAM)
Me. Sebastião Rodrigues Moura - Instituto Federal de Educação do Pará (IFPA)
Me. Wanderson Diogo A. da Silva - Universidade Regional do Cariri (URCA)
Ma. Heloisa Fernanda Francisco Batista - Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Ma. Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual do Centro Oeste (Unicentro)

Wissen Editora, 2026 | ISBN 978-65-6219-017-5 | DOI: 10.52832/wed.222

Me. Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Wissen Editora, 2026 | ISBN 978-65-6219-017-5 | DOI: 10.52832/wed.222

ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA: TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM BIOCARVÃO

Fundamentos, tecnologias e perspectivas para o desenvolvimento sustentável

http://www.doi.org/10.52832/wed.222

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Economia circular na Amazônia [livro eletrônico]: transformando resíduos em biocarvão: fundamentos, tecnologias e perspectivas para odesenvolvimento sustentável / Bruno Kleidson daSilva Maia...[et al.]. -- Teresina, PI: Wissen Editora, 2026.
PDF

Outros autores: Matheus Gustavo dos Santos Canuto, Matheus Vinícius da Costa Pantoja, Kalwan MacielMartins de Jesus.
Bibliografia.
ISBN 978-65-6219-017-5
DOI: 10.52832/wed.222

1. Amazônia 2. Bioeconomia 3. Desenvolvimento sustentável - Amazônia 4. Economia circular I. Maia, Bruno Kleidson da Silva. II. Canuto, Matheus Gustavo dos Santos. III. Pantoja, Matheus Vinícius da Costa. IV. Jesus, Kalwan Maciel Martinsde.

26-402038.0 CDD-338.9

Índices para catálogo sistemático:

1. Desenvolvimento sustentável: Economia 338.9

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Informações sobre a Wissen Editora
Homepage: www.editorawissen.com.br
Teresina - Piauí, Brasil
E-mail: wisseneditora@gmail.com

Como citar ABNT: MAIA, B. K. S. et al. **Economia circular na Amazônia: transformando resíduos em biocarvão**. v. 1, Teresina-PI: Wissen Editora, 2026. p. 240. DOI: 10.52832/wed.222

Teresina-PI, 2026

SOBRE OS AUTORES

Bruno Kleidson da Silva Maia



Engenheiro agrônomo pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), mestre em Agronomia (Ciência do Solo) e doutorando pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Câmpus de Jaboticabal. Integra o Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS), participando de pesquisas com culturas amazônicas e de ações de extensão voltadas ao reaproveitamento de resíduos orgânicos na agricultura. Sua atuação concentra-se no manejo e na fertilidade do solo, com destaque para o aproveitamento agrícola de resíduos e o desenvolvimento de cultivos na Amazônia. No mestrado, investigou o uso de biocarvão produzido a partir de resíduos do cupuaçuzeiro, associado à adubação orgânica e mineral, no desenvolvimento do jambu. Seus estudos dialogam com os princípios da economia circular ao explorar a transformação de resíduos regionais em insumos para a produção agrícola. E-mail: bruno.maia@unesp.br.

Matheus Gustavo dos Santos Canuto



Graduando em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e integrante do Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS). Foi bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Extensão (PIBEX), atuando no projeto "Manejo Sustentável de Solos da Amazônia". Atualmente, é bolsista de iniciação científica e desenvolve pesquisa sobre o uso de biocarvão de caroço de açaí na imobilização de cádmio no solo, explorando o potencial de resíduos amazônicos para o manejo de áreas contaminadas. É coautor de trabalho científico sobre nutrição mineral e desenvolvimento de plantas jovens de cupuaçuzeiro. Sua trajetória acadêmica reúne atividades de pesquisa e extensão relacionadas ao manejo do solo e ao aproveitamento de resíduos regionais, em sintonia com os princípios da economia circular e da sustentabilidade na agricultura amazônica. E-mail: engmatheuscanuto@gmail.com.

Matheus Vinicius da Costa Pantoja



Engenheiro ambiental pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e mestrando em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP). Integra o Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS). Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica, desenvolvendo pesquisas sobre o aproveitamento de resíduos orgânicos na agricultura. Seus trabalhos incluem a utilização desses materiais como condicionantes do solo e sua aplicação no desenvolvimento de mudas de cupuaçuzeiro, articulando conhecimentos de engenharia ambiental e ciência do solo. Sua trajetória acadêmica está relacionada à valorização de resíduos e ao estudo de alternativas de adubação para culturas amazônicas, temas que se aproximam dos princípios da economia circular e do uso sustentável dos recursos regionais. E-mail: matheus.pantoja@unesp.br.

Kalwan Maciel Martins de Jesus



Graduando em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e integrante do Grupo de Pesquisa e Extensão em Manejo e Fertilidade do Solo (GPEMFS). Desenvolve pesquisa no programa de iniciação científica sobre a resposta do jambu (*Acmella oleracea*) à aplicação de doses de níquel, avaliando o crescimento, a nutrição mineral e a eficiência no uso de nutrientes. Sua formação acadêmica envolve estudos relacionados à fertilidade do solo e ao manejo nutricional de culturas amazônicas. É coautor de publicação sobre bioeconomia na Amazônia, ampliando sua participação em discussões sobre o aproveitamento sustentável dos recursos regionais. Sua trajetória reúne o estudo da produção agrícola e da sustentabilidade, com atenção às particularidades da agricultura amazônica. E-mail: kalwanjesus6@gmail.com.

APRESENTAÇÃO

A economia contemporânea depende de fluxos crescentes de biomassa, minerais, combustíveis fósseis e outros recursos. Embora esses fluxos sustentem a produção de alimentos, energia, infraestrutura e bens de consumo, o padrão dominante ainda é marcado pela extração de matérias-primas, transformação, uso relativamente curto e descarte. O Global Resources Outlook 2024 alerta que, sem mudanças estruturais, a extração mundial de recursos poderá crescer cerca de 60% até 2060, ampliando pressões sobre clima, biodiversidade, água e saúde humana (United Nations Environment Programme; International Resource Panel, 2024).

Na Amazônia, essa discussão adquire características próprias. A região concentra diversidade biológica e cultural, cadeias agroextrativistas, atividades agroindustriais e centros urbanos que geram materiais residuais com composição, volume e sazonalidade distintos. Caroços de açaí, cascas de cacau e cupuaçu, resíduos de coco, castanha, dendê e madeira podem representar um problema quando acumulados ou descartados inadequadamente. Entretanto, sua simples transformação em novos produtos não garante sustentabilidade: é necessário avaliar origem, quantidade disponível, usos concorrentes, distância de transporte, consumo de energia, emissões, segurança do produto e distribuição dos benefícios.

A economia circular oferece uma lente para organizar essa avaliação. Em vez de limitar a gestão ambiental à destinação final, ela desloca a atenção para o desenho dos sistemas produtivos, a prevenção de perdas, a permanência do valor dos recursos e a regeneração dos sistemas naturais. No Brasil, o Decreto nº 12.082/2024 instituiu a Estratégia Nacional de Economia Circular e reconheceu oficialmente a necessidade de transição do modelo linear para um sistema que retenha, recupere e adicione valor aos recursos (Brasil, 2024).

Dentro desse horizonte, o biocarvão - também denominado biochar na literatura internacional - pode atuar como uma rota de valorização para determinados resíduos lignocelulósicos. Sua produção resulta da conversão termoquímica da biomassa sob disponibilidade limitada de oxigênio. As propriedades do material, contudo, variam intensamente conforme a matéria-prima, a temperatura, o tempo de residência e o sistema de produção. Por isso, o livro não tratará o biocarvão como uma substância uniforme nem como solução aplicável a qualquer resíduo.

O objetivo desta obra é integrar fundamentos de economia circular, conhecimento sobre resíduos amazônicos, ciência do biocarvão, aplicações agrícolas e ambientais, análise de sustentabilidade, modelos de negócio e políticas públicas. A abordagem será técnico-científica, mas redigida de modo acessível a estudantes, profissionais, pesquisadores, gestores, empreendedores e organizações comunitárias interessadas em alternativas de desenvolvimento compatíveis com a conservação da Amazônia.

Ao longo dos capítulos, serão valorizados estudos desenvolvidos na própria região amazônica, sem perder a interlocução com a literatura internacional. Benefícios e limitações serão discutidos conjuntamente. Essa postura é essencial para distinguir inovação real de soluções apenas aparentes e para identificar em quais condições a transformação de resíduos em biocarvão pode produzir resultados ambientais, agronômicos, sociais e econômicos consistentes.

SUMÁRIO

PARTE I **28**

ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA **28**

CAPÍTULO 1 ..... **29**

ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA: CONCEITOS, ESTRATÉGIAS, BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES **29**

Bruno Kleidson da Silva Maia 29

Matheus Gustavo dos Santos Canuto 29

Matheus Vinícius da Costa Pantoja 29

Michelle do Socorro Cantão dos Santos 29

Thayná da Cruz Ferreira 29

Antônia Kelly de Abreu Lobo 29

Karla Wanessa Praia e Silva 29

Jessé Ribeiro Magno 29

Paola France Santos de Castro 29

Pedro Lucas Magno Bulhões 29

CAPÍTULO 2 ..... **56**

BIOECONOMIA E DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL NA AMAZÔNIA: DIVERSIDADE SOCIOECOLÓGICA, CIRCULARIDADE E VALORIZAÇÃO LOCAL **56**

Kalwan Maciel Martins de Jesus 56

Bruno Kleidson da Silva Maia 56

Michelle do Socorro Cantão dos Santos 56

Thayná da Cruz Ferreira 56

Luan Gabriel Belém dos Santos 56

Joélly Luana Brito Santos 56

Antônia Kelly de Abreu Lobo 56

Mauricio Willians de Lima 56

Yanna Karolynne Pereira da Silva 56

Stephanie dos Santos Cunha 56

CAPÍTULO 3 ..... **71**

RESÍDUOS AMAZÔNICOS: GERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E CRITÉRIOS PARA APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL **71**

Luan Gabriel Belém dos Santos 71
Bruno Kleidson da Silva Maia 71
Matheus Gustavo dos Santos Canuto 71
Matheus Vinícius da Costa Pantoja 71
Michelle do Socorro Cantão dos Santos 71
Paulo Ricardo de Carvalho Esquerdo 71
Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior 71
Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues 71
Amanda Santos Araújo 71
Pedro Lucas Magno Bulhões 71

PARTE II 90

BIOCARVÃO: PRODUÇÃO, QUALIDADE E APLICAÇÕES 90

CAPÍTULO 4 91

BIOCARVÃO E OUTROS MATERIAIS CARBONOSOS: CONCEITOS, PROPRIEDADES E CRITÉRIOS DE DIFERENCIAÇÃO 91

Bruno Kleidson da Silva Maia 91
Matheus Gustavo dos Santos Canuto 91
Matheus Vinícius da Costa Pantoja 91
Anne Cristina Barbosa Alves 91
Ana Clara Ribeiro Gonçalves 91
Thaysa Helena Alves Farias 91
Paola France Santos de Castro 91
Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues 91
Carlos Antônio Marinho Mendonça Oliveira 91
João Victor Costa Rezende 91

CAPÍTULO 5 116

TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSAS: PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO E PRODUTOS ASSOCIADOS 116

Matheus Gustavo dos Santos Canuto 116
Bruno Kleidson da Silva Maia 116
Anne Cristina Barbosa Alves 116
Bruna Amanda Sousa Rodrigues 116

Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues 116
Mauricio Willians de Lima 116
Joélly Luana Brito Santos 116
Kalil Oliveira Belém 116
Pedro Henrique Cardoso da Costa 116
Amiel Johnson Cardoso Pimenta 116
CAPÍTULO 6 139
CARACTERIZAÇÃO, CONTROLE DE QUALIDADE E SEGURANÇA DO BIOCARVÃO 139
Matheus Gustavo dos Santos Canuto 139
Bruno Kleidson da Silva Maia 139
Anne Cristina Barbosa Alves 139
João Victor Costa Rezende 139
Lucas Lima Amorim 139
Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior 139
Joélly Luana Brito Santos 139
Antônia Kelly de Abreu Lobo 139
Pedro Henrique Cardoso da Costa 139
Amiel Johnson Cardoso Pimenta 139
CAPÍTULO 7 162
APLICAÇÕES AGRÍCOLAS DO BIOCARVÃO EM SOLOS TROPICAIS E AMAZÔNICOS 162
Bruno Kleidson da Silva Maia 162
Matheus Gustavo dos Santos Canuto 162
Matheus Vinícius da Costa Pantoja 162
Anne Cristina Barbosa Alves 162
Paulo Ricardo de Carvalho Esquerdo 162
Kalwan Maciel Martins de Jesus 162
Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior 162
Thaysa Helena Alves Farias 162
Arthur Masaaki Maeda Nagase 162
Pedro Henrique Cardoso da Costa 162

CAPÍTULO 8 ..... **186**

PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: ESTUDOS DE CASO E EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS **186**

Matheus Gustavo dos Santos Canuto 186

Bruno Kleidson da Silva Maia 186

Matheus Vinícius da Costa Pantoja 186

Antonio Ralyson Nascimento da Silva 186

Anne Cristina Barbosa Alves 186

Cecília da Silva Brandão 186

Alessandra Marie Ohashi 186

Arthur Masaaki Maeda Nagase 186

Amanda Santos Araújo 186

Pedro Henrique Cardoso da Costa 186

PARTE III **209**

SUSTENTABILIDADE, IMPLEMENTAÇÃO E FUTURO **209**

CAPÍTULO 9 ..... **210**

IMPLEMENTAÇÃO DE CADEIAS DE BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: POLÍTICAS PÚBLICAS, BARREIRAS E ESTRATÉGIAS **210**

Matheus Vinícius da Costa Pantoja 210

Matheus Gustavo dos Santos Canuto 210

Kalil Oliveira Belém 210

Ana Carollyne Pereira da Silva 210

Mauricio Willians de Lima 210

Daniel Silva Rodrigues 210

Yanna Karolynne Pereira da Silva 210

Lilian Bastos dos Santos Campos 210

Estela Siqueira do Nascimento Nunes 210

Pedro Lucas Magno Bulhões 210

CAPÍTULO 10 ..... **234**

FUTURO DO BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: INOVAÇÃO, PRIORIDADES DE PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA CONSOLIDAÇÃO REGIONAL **234**

Matheus Vinícius da Costa Pantoja 234

Kalwan Maciel Martins de Jesus 234

Bruno Kleidson da Silva Maia 234
Pedro Lucas Magno Bulhões 234
Wanderson Vinícius Assis Ferreira 234
Maria Luiza Ferreira Leal 234
Evelyn Suzana Bouth Lopes 234
Maria Luiza Godinho da Rocha 234
Victoria Deceles Pinheiro de Menezes 234
Silvia Letícia da Costa Azevedo 234



PARTE I

ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA

CAPÍTULO 1

ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA: CONCEITOS, ESTRATÉGIAS, BENEFÍCIOS E LIMITAÇÕES

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista – UNESP.

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Michelle do Socorro Cantão dos Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Thayná da Cruz Ferreira
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Antônia Kelly de Abreu Lobo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Karla Wanessa Praia e Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Jessé Ribeiro Magno
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Paola France Santos de Castro
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Pedro Lucas Magno Bulhões
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1287

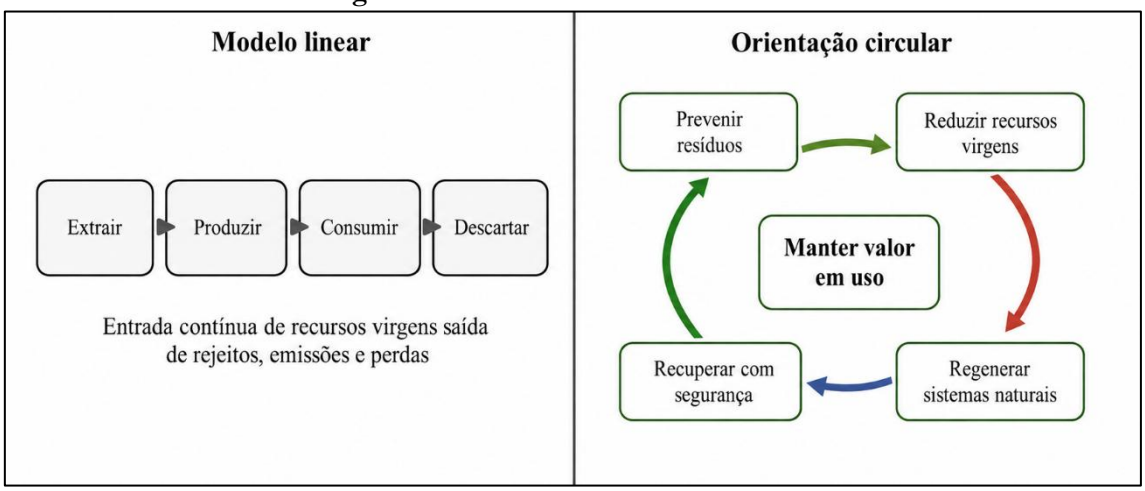
Neste capítulo, a economia circular é apresentada como uma estratégia sistêmica e condicionada. Ela pode contribuir para a sustentabilidade, mas seus benefícios precisam ser demonstrados por indicadores ambientais, sociais e econômicos, e não presumidos apenas porque um resíduo foi reaproveitado.

1.1 O problema do modelo linear

O modelo linear de produção costuma ser resumido pela sequência extrair, produzir, consumir e descartar. Essa representação não significa que todos os sistemas produtivos funcionem de maneira idêntica, mas evidencia uma característica recorrente: a entrada contínua de recursos virgens e a saída de grandes volumes de rejeitos, emissões e produtos que perdem rapidamente sua função econômica. Quando os custos ambientais e sociais permanecem fora dos preços, torna-se mais barato substituir do que conservar, reparar ou reintegrar materiais aos processos produtivos.

A linearidade também se manifesta na forma como os problemas ambientais são administrados. Em vez de prevenir a geração, muitas políticas e empresas concentram esforços na coleta, no tratamento ou na disposição do resíduo depois que ele já foi produzido. Essas medidas continuam necessárias, especialmente para proteger a saúde pública, mas são insuficientes quando não alteram o desenho dos produtos, a escolha das matérias-primas, a eficiência dos processos e os padrões de consumo (Figura 1).

Figura 1 - Do modelo linear à economia circular.



Fonte: elaboração própria com base em Geissdoerfer et al. (2017), Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) e Bocken et al. (2016).

A pressão resultante não depende apenas do crescimento populacional. Ela é influenciada pela intensidade material dos sistemas de alimentação, mobilidade, moradia, energia e infraestrutura, além das desigualdades no acesso e no consumo. O aumento projetado da extração

de recursos até 2060 indica que ganhos isolados de eficiência não serão suficientes caso sejam acompanhados por expansão contínua da produção material (United Nations Environment Programme; International Resource Panel, 2024).

Nos sistemas baseados em biomassa, a linearidade assume contornos particulares. A biomassa é renovável apenas quando sua taxa de extração respeita a regeneração dos ecossistemas, o solo mantém sua capacidade produtiva e a retirada não compromete outros usos. Um resíduo agroindustrial, por exemplo, pode já desempenhar funções como combustível, cobertura do solo, alimentação animal ou matéria-prima artesanal. Classificá-lo como disponível sem mapear esses usos pode deslocar impactos para outras etapas da cadeia (Figura 2).

Figura 2 – Transição do modelo linear de produção para uma orientação circular no contexto amazônico. *O fluxo linear é caracterizado pela extração contínua de recursos, produção, consumo e descarte. A orientação circular prioriza a prevenção, a durabilidade, o reparo, a reutilização, a recuperação segura dos materiais e a regeneração dos sistemas naturais, reconhecendo a existência de perdas inevitáveis de matéria e energia.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Geissdoerfer et al. (2017), Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) e Bocken et al. (2016).

1.2 Origem e formação do pensamento circular

A economia circular não surgiu de uma única teoria nem pode ser atribuída a um único autor. Sua formação reúne contribuições da economia ecológica, ecologia industrial, produção mais limpa, gestão de resíduos, logística reversa, design regenerativo, simbiose industrial e economia de desempenho. Murray, Skene e Haynes (2017) observam que o conceito combina antecedentes provenientes da economia e da ecologia; a revisão de Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016) também evidencia essa formação interdisciplinar. Essa origem explica tanto sua capacidade integradora quanto a variedade de interpretações existentes.

A ecologia industrial contribuiu ao comparar sistemas produtivos com ecossistemas, nos quais os fluxos de matéria e energia são interdependentes. Nessa perspectiva, subprodutos de uma atividade podem alimentar outra, desde que sejam tecnicamente compatíveis e que a conexão produza vantagens ambientais reais. A produção mais limpa acrescentou a prioridade da prevenção, buscando reduzir perdas e substâncias perigosas na origem, em vez de transferir o problema para tecnologias de tratamento no fim do processo.

A economia de desempenho enfatizou a prestação de serviços e a manutenção da função dos bens. Quando o fabricante permanece responsável pelo produto ou vende desempenho em vez de quantidade, pode haver maior incentivo à durabilidade, manutenção, atualização e recuperação de componentes. Stahel (2016) relaciona essa lógica à conservação de recursos e à criação de atividades locais de reparo e manutenção.

O design circular expandiu essa discussão ao mostrar que muitas possibilidades de reaproveitamento são definidas antes da fabricação. Materiais inseparáveis, componentes não reparáveis, presença de substâncias tóxicas e ausência de informação dificultam a recuperação. Por essa razão, Bocken et al. (2016) organizam estratégias de design e modelos de negócio voltados a reduzir fluxos, prolongar ciclos de uso e recuperar valor ao final de cada etapa.

A diversidade de origens ajudou a popularizar a economia circular, mas também produziu ambiguidades. Em alguns contextos, o termo designa reciclagem ampliada; em outros, representa reorganização profunda dos sistemas de produção e consumo. Essa diferença não é apenas semântica: ela determina quais ações recebem prioridade, quais indicadores são utilizados e quais grupos participam das decisões.

1.3 O que é economia circular?

Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) analisaram 114 definições publicadas e demonstraram que não havia consenso completo sobre o conceito. Redução, reutilização e reciclagem apareciam com frequência, enquanto dimensões sociais e mudanças sistêmicas eram menos explícitas. Em uma revisão posterior de 221 definições, Kirchherr et al. (2023) identificaram simultaneamente consolidação e diferenciação: alguns elementos tornaram-se mais recorrentes, mas a variedade de interpretações permaneceu.

Para este livro, economia circular será entendida como um sistema de produção e consumo orientado a prevenir resíduos e poluição, reduzir a dependência de recursos virgens, manter produtos e materiais em uso com o maior valor possível, recuperar recursos de forma segura e favorecer a regeneração dos sistemas naturais. Essa definição integra dimensões técnicas,

econômicas, ambientais e sociais e impede que uma atividade seja classificada como circular apenas porque utiliza um material residual.

A circularidade descreve o modo como produtos, componentes, materiais, água, nutrientes e energia circulam ou permanecem úteis no sistema. Sustentabilidade é um objetivo normativo mais amplo, relacionado à integridade ambiental, justiça social, viabilidade econômica e bem-estar entre gerações. Portanto, uma estratégia pode aumentar a circularidade de um fluxo e ainda assim produzir impactos indesejáveis em outra dimensão. Geissdoerfer et al. (2017) destacam que os dois conceitos se relacionam, mas não são equivalentes.

A reciclagem é apenas uma das estratégias possíveis e geralmente preserva menos valor que a manutenção da função original. Reutilizar um equipamento completo, reparar um componente ou evitar a fabricação tende a conservar mais trabalho, energia e organização incorporados do que reduzir o produto a matéria-prima. Isso não elimina a importância da reciclagem, mas a posiciona dentro de uma hierarquia de retenção de valor.

Também é necessário distinguir circularidade de aproveitamento indiscriminado. Um fluxo contaminado pode recircular substâncias perigosas; um material transportado por longas distâncias pode consumir mais energia do que a alternativa que pretende substituir; e a demanda por uma matéria-prima residual pode estimular sua produção deliberada. Assim, a classificação deve considerar o sistema completo e seus efeitos, não apenas a existência de uma etapa de recuperação.

1.4 Princípios e estratégias de circularidade

As estratégias circulares podem ser organizadas conforme a quantidade de valor que preservam. Reike, Vermeulen e Witjes (2018) mostram que as diferentes estruturas baseadas em ações iniciadas pela letra R não são idênticas, mas compartilham uma lógica geral: prevenir e reduzir ocupam posições superiores; reutilizar, reparar e remanufaturar prolongam o uso; reciclar recupera materiais; e a recuperação energética aparece quando opções de maior valor não são tecnicamente viáveis.

Prevenir e repensar. Questionar a necessidade do produto ou processo, eliminar perdas desde o planejamento e substituir soluções descartáveis por sistemas duráveis, compartilhados ou de menor intensidade material.

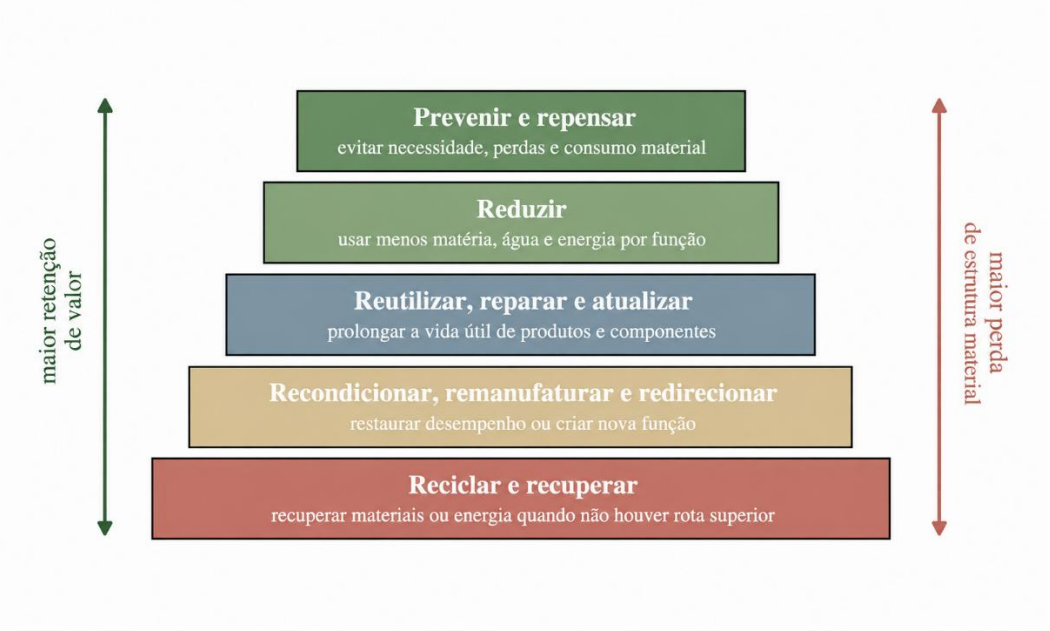
Reduzir. Diminuir a quantidade de matéria, água e energia necessária para entregar uma função, sem transferir impactos para outra etapa do ciclo de vida.

Reutilizar, reparar e atualizar. Prolongar a vida útil de produtos e componentes, preservando o trabalho e a energia já incorporados.

Recondicionar, remanufaturar e redirecionar. Restaurar o desempenho ou utilizar componentes e materiais em novas funções quando a função original não puder ser mantida.

Reciclar e recuperar. Reintroduzir materiais em processos produtivos ou recuperar energia apenas após avaliar a inviabilidade de estratégias que conservem maior valor.

Figura 3 - Hierarquia de retenção de valor nas estratégias circulares



Fonte: elaboração própria com base em Reike, Vermeulen e Witjes (2018) e Morseletto (2020).

Morseletto (2020) argumenta que metas de economia circular precisam ser associadas a estratégias específicas. Uma meta genérica de aumento da reciclagem, por exemplo, pode conviver com crescimento absoluto do consumo de matéria-prima. Indicadores mais informativos combinam prevenção, produtividade dos recursos, duração dos produtos, substituição efetiva de recursos virgens, segurança dos ciclos e redução absoluta de impactos (Figura 4).

Figura 4. Hierarquia das estratégias circulares de acordo com a capacidade de retenção de valor. *As estratégias são apresentadas em ordem decrescente de preservação do valor incorporado. Prevenir, repensar e reduzir evitam a geração de perdas; reutilizar, reparar e atualizar conservam a função original; recondicionar e remanufaturar recuperam produtos e componentes; reciclar preserva principalmente a matéria; e a recuperação energética constitui a última alternativa, pois encerra o ciclo material.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Reike, Vermeulen e Witjes (2018) e Morseletto (2020).

Nos ciclos biológicos, materiais orgânicos seguros podem retornar aos sistemas produtivos por rotas como compostagem, digestão anaeróbia, alimentação animal, cobertura do solo ou conversão termoquímica. A seleção depende da composição do resíduo, umidade, concentração de nutrientes, presença de contaminantes, escala e demanda local. O biocarvão é uma possibilidade entre várias e deve ser comparado com usos alternativos, e não escolhido antecipadamente.

Nos ciclos técnicos, a prioridade recai sobre durabilidade, manutenção, desmontagem, reutilização de componentes e reciclagem de materiais. Em ambos os ciclos, o princípio fundamental é evitar a perda prematura de valor. A recuperação energética pode ser útil para frações sem alternativa de maior valor, mas a combustão encerra a possibilidade de recuperar a estrutura material e não deve ser apresentada como equivalente à prevenção ou à reutilização (Figura 5).

Figura 5 – Integração dos ciclos biológico e técnico em um sistema de economia circular. *No ciclo biológico, biomassas seguras podem ser utilizadas em cascata e destinadas à compostagem, digestão anaeróbia ou conversão termoquímica controlada, permitindo o retorno de nutrientes e carbono ao solo. No ciclo técnico, produtos e componentes são mantidos em uso por meio de manutenção, reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem. As saídas abertas representam perdas inevitáveis, demanda de energia, desgaste e rejeitos.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Reike, Vermeulen e Witjes (2018) e Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018).

1.5 Economia linear e economia circular

O quadro 1 compara as características dos modelos de economia linear e circular.

Quando 1 - Comparação entre características dos modelos linear e circular

Dimensão	Predominância linear	Orientação circular
Objetivo produtivo	Ampliar vendas e fluxo de materiais	Entregar função preservando valor e reduzindo impactos.
Matérias-primas	Dependência recorrente de recursos virgens	Prevenção, uso eficiente e substituição segura por recursos recuperados.
Produto	Vida útil curta e baixa reparabilidade	Durabilidade, manutenção, atualização e desmontagem.
Resíduo	Custo externo ou problema de destinação	Fluxo a prevenir; quando inevitável, recurso potencial sujeito a critérios
Indicadores	Produção, venda e custo unitário	Função, vida útil, retenção de valor e impactos no ciclo de vida.
Responsabilidade	Concentrada no descarte e no consumidor	Compartilhada entre projeto, produção, consumo, retorno e gestão pública.

Fonte: elaboração própria com base em Geissdoerfer et al. (2017), Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) e Bocken et al. (2016).

A tabela apresenta orientações predominantes, e não categorias absolutas. Sistemas reais combinam elementos lineares e circulares. Uma agroindústria pode reutilizar parte de seus resíduos, mas continuar dependente de insumos de alto impacto; da mesma forma, uma cadeia pode ser eficiente na reciclagem e pouco eficiente na prevenção. O diagnóstico deve identificar onde o valor é perdido e quais mudanças possuem maior capacidade de reduzir impactos.

1.6 Benefícios ambientais potenciais

O primeiro benefício esperado da economia circular é reduzir a necessidade de extração de recursos virgens. Isso pode ocorrer pela prevenção do consumo, aumento da durabilidade, compartilhamento, reutilização, remanufatura e substituição efetiva por materiais recuperados. O resultado, entretanto, precisa ser medido em termos absolutos: utilizar menos material por unidade é positivo, mas pode não diminuir a extração total se a quantidade produzida crescer mais rapidamente que a eficiência.

A prevenção de resíduos também pode reduzir emissões, contaminação do solo e da água, ocupação de áreas de disposição e custos de tratamento. Nos fluxos orgânicos, a destinação adequada evita decomposição descontrolada e permite recuperar nutrientes, energia ou carbono. Cada rota, porém, apresenta vantagens e limitações. Materiais muito úmidos podem favorecer processos biológicos; resíduos secos e lignocelulósicos podem ser mais adequados à conversão termoquímica; materiais contaminados podem exigir tratamento ou rejeição.

Outro benefício potencial é a conservação do valor incorporado. Um produto pronto reúne matéria-prima, energia, conhecimento, transporte e trabalho. Quando ele é descartado prematuramente e apenas seus materiais são reciclados, parte substancial desse valor é perdida. Estratégias que prolongam a vida útil tendem a evitar etapas produtivas adicionais e, por isso, ocupam posições superiores nas hierarquias de circularidade (Reike; Vermeulen; Witjes, 2018).

A regeneração dos sistemas naturais representa uma dimensão mais exigente. Não basta reduzir danos; é necessário recuperar funções ecológicas, fertilidade, biodiversidade e capacidade de resiliência. Em cadeias de base biológica, isso implica respeitar taxas de renovação, devolver nutrientes com segurança, manter cobertura do solo e impedir que a demanda por biomassa pressione ecossistemas naturais. Velenturf e Purnell (2021) defendem que uma economia circular sustentável deve combinar prosperidade, qualidade ambiental e acesso justo aos recursos.

A avaliação do ciclo de vida é fundamental para comparar alternativas. Ela permite identificar deslocamentos de impacto entre etapas, regiões ou categorias ambientais. Uma solução que reduz resíduos localmente pode aumentar emissões no transporte ou demandar energia de

origem fóssil. Por essa razão, os capítulos posteriores examinarão o biocarvão dentro do sistema completo de coleta, secagem, conversão, uso dos coprodutos, transporte e aplicação.

1.7 Benefícios socioeconômicos potenciais

A circularidade pode criar oportunidades econômicas ao transformar custos de perda e descarte em atividades de prevenção, manutenção, logística reversa, recondicionamento e processamento. Stahel (2016) destaca que os ciclos de reparo e extensão de vida tendem a demandar serviços próximos aos usuários, o que pode favorecer trabalho local. Todavia, a criação de ocupações não é suficiente por si só: é preciso observar remuneração, segurança, formalização, capacitação e participação nos resultados.

Modelos de negócio circulares modificam a forma de gerar receita. Empresas podem vender desempenho, oferecer manutenção, recuperar produtos, compartilhar ativos ou integrar subprodutos de diferentes cadeias. Bocken et al. (2016) mostram que mudanças no modelo de negócio e no design precisam ocorrer de maneira coordenada; caso contrário, um produto tecnicamente reparável pode continuar sendo economicamente descartável.

A redução da dependência de insumos importados pode aumentar a resiliência das cadeias produtivas, especialmente em territórios com transporte caro ou irregular. Recursos recuperados localmente podem reduzir vulnerabilidade a preços, interrupções logísticas e sazonalidade. Esse benefício somente se confirma quando existe qualidade padronizada, oferta previsível e capacidade técnica para integrar o material ao processo produtivo.

Na Amazônia, arranjos circulares podem fortalecer cooperativas, associações comunitárias, agroindústrias familiares, prestadores de serviço e redes de pesquisa. O estudo de Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) mostra que iniciativas de cogestão e cadeias da sociobiodiversidade podem oferecer infraestrutura social importante para integrar resíduos e atividades produtivas em pequenos centros urbanos amazônicos. Ainda assim, a ausência de assistência técnica, financiamento e logística pode limitar a escala e a continuidade das iniciativas.

A distribuição de custos e benefícios deve ser explícita. Comunidades não podem assumir riscos de poluição e trabalho precário enquanto outros agentes concentram o valor do produto final. Uma transição circular socialmente consistente requer contratos transparentes, rastreabilidade, participação nas decisões, reconhecimento de conhecimentos locais e mecanismos que retornem valor aos territórios onde os recursos são gerados.

1.8 Limitações e riscos: circular não significa automaticamente sustentável

A economia circular é frequentemente comunicada por imagens de ciclos completos, mas nenhum sistema material é perfeitamente fechado. Há perdas por desgaste, dispersão,

contaminação e degradação da qualidade, além de necessidade de energia para coletar, separar e reprocessar materiais. Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018) destacam limitações termodinâmicas, espaciais e temporais que precisam ser incorporadas à análise científica.

O efeito rebote constitui uma dessas limitações. Quando uma alternativa circular reduz o custo ou melhora a eficiência, ela pode estimular maior consumo e compensar parte dos benefícios. Zink e Geyer (2017) denominam esse fenômeno de rebote da economia circular. A venda de produtos secundários, por exemplo, só reduz a produção primária quando realmente substitui uma compra nova; se apenas amplia o mercado, a redução esperada será menor.

A circulação também pode prolongar a presença de contaminantes. Materiais oriundos de cadeias distintas podem conter metais, compostos orgânicos persistentes ou aditivos incompatíveis com o novo uso. Para resíduos destinados ao solo, a avaliação deve ser ainda mais rigorosa, porque substâncias acumuladas podem alcançar plantas, água e organismos. No caso do biocarvão, qualidade e segurança dependem tanto da biomassa quanto das condições de produção.

Outro risco é reduzir a economia circular a uma agenda tecnológica. Equipamentos, plataformas digitais e novos materiais são importantes, mas não substituem governança, infraestrutura, direitos e mudanças nos padrões de produção. Corvellec, Stowell e Johansson (2022) reúnem críticas segundo as quais versões excessivamente técnicas podem ocultar conflitos distributivos e preservar o crescimento do consumo sob uma aparência de circularidade.

Há ainda riscos territoriais. A valorização econômica de um resíduo pode aumentar sua coleta além do limite sustentável, retirar matéria orgânica necessária ao solo ou competir com usos tradicionais. A instalação de grandes unidades de processamento pode concentrar a matéria-prima, aumentar distâncias de transporte e excluir operadores de menor escala. Portanto, a escolha entre sistemas centralizados e descentralizados precisa considerar volume, densidade, sazonalidade, energia, capacidade de controle e participação local.

Essas limitações não invalidam a economia circular. Elas tornam sua aplicação mais rigorosa. Uma estratégia deve demonstrar prevenção ou substituição efetiva, redução de impactos no ciclo de vida, segurança dos materiais, viabilidade econômica e contribuição social. Quando esses critérios não são verificados, o termo circular pode funcionar apenas como linguagem promocional (Figura 6).

Figura 6. Etapas de avaliação da sustentabilidade de uma estratégia de economia circular. *Uma proposta de aproveitamento de resíduos deve demonstrar: substituição efetiva de recursos virgens; redução dos impactos no ciclo de vida; segurança e qualidade dos materiais; viabilidade econômica e logística; e distribuição socialmente justa dos custos, riscos e benefícios. A reprovação em qualquer uma dessas etapas exige o redesenho da proposta, a comparação com outra rota ou a rejeição da alternativa.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018), Velenturf e Purnell (2021) e Corvellec, Stowell e Johansson (2022).

1.9 Economia circular no contexto amazônico

A Amazônia não constitui um território homogêneo. Capitais, cidades intermediárias, comunidades ribeirinhas, assentamentos, polos agroindustriais e áreas de produção florestal possuem estruturas distintas de geração de resíduos, energia, transporte, mercado e governança. Modelos importados de regiões densamente industrializadas precisam ser adaptados a essa diversidade, e não simplesmente reproduzidos.

As grandes distâncias e a dependência de transporte fluvial ou rodoviário aumentam o custo de movimentar materiais de baixo valor e baixa densidade. Por outro lado, o mesmo isolamento torna cara a importação de insumos e pode favorecer soluções locais quando há escala, qualidade e demanda. Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) ressaltam que as dificuldades logísticas convivem com oportunidades de articular organizações comunitárias, gestão de resíduos e cadeias da sociobiodiversidade.

Os resíduos agroindustriais merecem atenção porque são gerados de forma concentrada durante o beneficiamento. Caroços, cascas, fibras e podas podem ser mais fáceis de coletar que resíduos dispersos no campo. Contudo, a sazonalidade pode deixar equipamentos ociosos durante parte do ano, e a elevada umidade de alguns materiais aumenta o consumo energético da secagem. Esses fatores serão essenciais para avaliar a produção de biocarvão.

A abordagem circular deve começar por um inventário territorial: quem gera o material, em que quantidade, durante quais meses, com qual composição, quais usos já existem, que riscos estão associados e quem demanda o produto recuperado. Essa sequência evita que uma tecnologia seja escolhida antes da compreensão do problema e permite comparar compostagem, digestão anaeróbia, alimentação animal, materiais, energia e biocarvão (Figura 7).

Figura 7 – Inventário territorial e comparação de alternativas para o aproveitamento de resíduos na Amazônia. *O diagnóstico territorial considera a origem, a quantidade, a composição e a sazonalidade dos resíduos, bem como seus usos existentes, riscos, condições de armazenamento, transporte fluvial e rodoviário, capacidade de controle, participação comunitária e demanda pelos produtos recuperados. As diferentes rotas devem ser comparadas antes da escolha tecnológica, pois nenhuma alternativa é automaticamente superior em todos os territórios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) e Brasil (2024).

A Estratégia Nacional de Economia Circular cria um marco favorável ao articular prevenção de resíduos, circulação de produtos e regeneração (Brasil, 2024). Sua aplicação na Amazônia dependerá de políticas complementares de saneamento, ciência e tecnologia, assistência técnica, infraestrutura, desenvolvimento regional e proteção da biodiversidade. Também exigirá indicadores que captem benefícios locais, e não apenas volume processado.

Neste livro, a transformação de resíduos em biocarvão será avaliada como uma rota possível dentro de um portfólio de alternativas. A pergunta central não será apenas se um resíduo pode ser carbonizado, mas se deve ser carbonizado, em quais condições, com quais controles, para qual finalidade e com que resultados comparados aos demais usos disponíveis.

1.10 Economia circular e os objetivos de desenvolvimento sustentável: caminhos para a sustentabilidade na Amazônia

A transição para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis constitui um dos principais desafios contemporâneos diante do crescimento populacional, da intensificação das atividades econômicas, do aumento da demanda por recursos naturais e da crescente geração de resíduos. Nesse contexto, a economia circular emerge como uma abordagem capaz de contribuir para a transformação dos sistemas de produção e consumo, ao propor a redução da geração de resíduos, a manutenção do valor de produtos e materiais e a regeneração dos sistemas naturais. Essa perspectiva apresenta forte convergência com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) no âmbito da Agenda 2030.

A Agenda 2030 estabelece uma visão integrada de desenvolvimento sustentável, articulando dimensões econômicas, sociais e ambientais. Os 17 ODS e suas 169 metas procuram orientar políticas públicas, estratégias empresariais, iniciativas científicas e ações da sociedade civil em direção à erradicação da pobreza, segurança alimentar, proteção ambiental, redução das desigualdades, produção e consumo responsáveis, ação climática e fortalecimento das parcerias para o desenvolvimento sustentável (United Nations, 2015).

No contexto amazônico, a articulação entre economia circular, bioeconomia e ODS assume importância particular. A região apresenta elevada diversidade biológica, grande disponibilidade de recursos naturais e ampla diversidade de sistemas produtivos, mas também enfrenta problemas relacionados à infraestrutura, logística, desigualdade socioeconômica, saneamento, gestão de resíduos e agregação de valor às cadeias produtivas. Dessa forma, a economia circular pode ser compreendida não apenas como uma estratégia de gestão de resíduos, mas como uma abordagem para reorganizar fluxos de materiais, energia, conhecimento e valor dentro dos territórios amazônicos.

A relação entre economia circular e ODS, entretanto, não deve ser interpretada de maneira automática. Embora práticas circulares possam contribuir para diversos objetivos, seus resultados dependem das condições em que são implementadas. Estudos demonstram que as maiores relações entre economia circular e ODS concentram-se especialmente nos ODS 6, 7, 8, 12 e 15, embora existam conexões com diversos outros objetivos (Schroeder; Angraeni; Weber, 2019). Assim, a circularidade precisa ser acompanhada por critérios ambientais, sociais, econômicos e territoriais para que efetivamente contribua para o desenvolvimento sustentável.

1.10.1 Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: fundamentos e perspectivas

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável foi adotada pelos Estados-membros das Nações Unidas em 2015 como um plano de ação global voltado à promoção do desenvolvimento sustentável. O documento estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e 169 metas, abrangendo questões relacionadas à pobreza, fome, saúde, educação, igualdade, água, energia, trabalho, infraestrutura, cidades, consumo, mudanças climáticas, oceanos, ecossistemas terrestres, instituições e cooperação internacional (United Nations, 2015).

Os ODS foram concebidos de forma integrada, reconhecendo que os desafios ambientais, sociais e econômicos não podem ser solucionados isoladamente. A pobreza, por exemplo, está relacionada ao acesso a alimentos, água, saneamento, educação, trabalho e serviços públicos. Da mesma forma, a degradação ambiental pode comprometer a produção de alimentos, a disponibilidade de água, a saúde das populações e a geração de renda. Essa interdependência é particularmente relevante para a Amazônia, onde os sistemas econômicos e sociais estão fortemente relacionados à disponibilidade e à conservação dos recursos naturais.

Os 17 ODS são:

1. Erradicação da pobreza;
2. Fome zero e agricultura sustentável;
3. Saúde e bem-estar;
4. Educação de qualidade;
5. Igualdade de gênero;
6. Água potável e saneamento;
7. Energia limpa e acessível;
8. Trabalho decente e crescimento econômico;
9. Indústria, inovação e infraestrutura;
10. Redução das desigualdades;
11. Cidades e comunidades sustentáveis;
12. Consumo e produção responsáveis;
13. Ação contra a mudança global do clima;
14. Vida na água;
15. Vida terrestre;
16. Paz, justiça e instituições eficazes; e
17. Parcerias e meios de implementação.

Embora todos os objetivos apresentem algum grau de relação com a sustentabilidade dos sistemas produtivos, alguns possuem conexão particularmente evidente com a economia circular.

O ODS 12, por exemplo, estabelece a necessidade de assegurar padrões sustentáveis de produção e consumo, incluindo a utilização eficiente dos recursos naturais, a redução da geração de resíduos, a gestão ambientalmente adequada de produtos químicos e resíduos e a redução do desperdício de alimentos (United Nations, 2015).

A importância desse objetivo tornou-se ainda mais evidente diante da persistência de padrões de produção e consumo intensivos em recursos. O relatório mais recente das Nações Unidas sobre o ODS 12 destaca que o consumo de materiais, a geração de resíduos alimentares e eletrônicos e a crescente pegada material continuam exercendo pressão sobre os sistemas ambientais, indicando a necessidade de transformações estruturais nos sistemas de produção e consumo (United Nations, 2025).

Nesse sentido, os ODS podem ser compreendidos como uma referência internacional para orientar políticas e estratégias de desenvolvimento, enquanto a economia circular oferece um conjunto de princípios e práticas capazes de operacionalizar parte dessas mudanças. A circularidade pode, portanto, funcionar como uma das ferramentas para transformar objetivos globais de sustentabilidade em ações concretas nos territórios.

No Brasil, essa relação ganhou maior importância com a instituição da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), por meio do Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. A política estabelece como finalidade promover a transição do modelo de produção linear para uma economia circular, estimulando o uso eficiente dos recursos naturais e práticas sustentáveis ao longo das cadeias produtivas. Entre suas diretrizes estão a redução da geração de resíduos, a manutenção do valor dos materiais, a regeneração ambiental, a produção e o consumo sustentáveis, o aumento da vida útil dos materiais e a promoção de uma transição justa e inclusiva (BRASIL, 2024a).

Essa institucionalização representa uma oportunidade para aproximar a agenda brasileira de economia circular dos compromissos estabelecidos pela Agenda 2030. No caso amazônico, essa integração pode contribuir para orientar políticas públicas e investimentos para atividades capazes de combinar conservação ambiental, geração de renda, inovação tecnológica e valorização das cadeias produtivas locais.

1.10.2 Relação entre economia circular e ODS

A economia circular propõe uma transformação na maneira como os recursos são extraídos, utilizados e reinseridos nos sistemas produtivos. Diferentemente do modelo linear, caracterizado pela sequência extração, produção, consumo e descarte, a circularidade procura manter produtos, componentes e materiais em circulação pelo maior tempo possível, reduzindo a necessidade de novas extrações e a geração de resíduos.

Essa lógica apresenta relação direta com diferentes ODS. Schroeder, Anggraeni e Weber (2019), ao analisarem a relação entre práticas de economia circular e as metas dos ODS, identificaram contribuições relevantes principalmente para os ODS 6, 7, 8, 12 e 15. Os autores também demonstram que as práticas circulares podem gerar efeitos sobre diferentes objetivos simultaneamente, embora existam possíveis conflitos entre algumas estratégias de reciclagem e aspectos relacionados à saúde, segurança ocupacional e condições de trabalho.

O ODS 6 (Água potável e saneamento) apresenta relação com a economia circular principalmente por meio do tratamento, reuso e recuperação de água e nutrientes. Sistemas de tratamento de águas residuárias, aproveitamento de lodos e recuperação de nutrientes podem reduzir a pressão sobre os recursos hídricos e diminuir o lançamento de contaminantes no ambiente. Na Amazônia, onde ainda existem importantes desafios relacionados ao saneamento básico, estratégias dessa natureza podem assumir relevância tanto ambiental quanto social.

O ODS 7 (Energia limpa e acessível) relaciona-se à valorização energética de resíduos e ao aproveitamento de biomassa. Resíduos agrícolas, agroindustriais e urbanos podem apresentar potencial para produção de biogás, biomassa energética e outros produtos, desde que sejam avaliadas sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. A utilização de resíduos como fonte energética pode reduzir a necessidade de recursos fósseis e, em determinados contextos, gerar alternativas descentralizadas para comunidades e empreendimentos.

O ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) está relacionado à possibilidade de criação de novas cadeias produtivas, empregos e oportunidades de geração de renda. A economia circular pode estimular atividades de coleta, triagem, reciclagem, compostagem, recuperação de materiais, reparação, reuso e desenvolvimento de novos produtos. Entretanto, a geração de trabalho precisa estar associada a condições adequadas de segurança, remuneração e inclusão social. A simples ampliação das atividades de reciclagem, sem melhoria das condições de trabalho, não representa necessariamente desenvolvimento sustentável.

O ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) relaciona-se diretamente ao desenvolvimento de tecnologias para reaproveitamento de materiais e resíduos. A inovação é necessária para transformar resíduos em matérias-primas secundárias, desenvolver novos materiais, aperfeiçoar processos de produção e criar sistemas de monitoramento da circularidade. No contexto amazônico, a pesquisa científica e tecnológica pode desempenhar papel estratégico na transformação de recursos e resíduos regionais em produtos de maior valor agregado.

O ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) possui forte relação com a gestão de resíduos sólidos urbanos, saneamento, mobilidade e planejamento territorial. A adoção de sistemas de coleta seletiva, compostagem de resíduos orgânicos, reciclagem e logística reversa pode reduzir

a pressão sobre aterros e áreas de disposição inadequada. Para cidades amazônicas, essas estratégias devem considerar as características territoriais, as distâncias entre municípios e comunidades e as dificuldades logísticas existentes.

O ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) constitui provavelmente o objetivo mais diretamente relacionado à economia circular. A redução da geração de resíduos, o aumento da eficiência no uso dos recursos, a reutilização, a reciclagem, o redesenho de produtos e a extensão da vida útil dos materiais são elementos centrais das estratégias circulares. A própria Estratégia Nacional de Economia Circular brasileira estabelece entre seus objetivos a redução da utilização de recursos e da geração de resíduos, a preservação do valor dos materiais e o estímulo à inovação e ao redesenho circular da produção (BRASIL, 2024a).

O ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) também apresenta relação importante com a economia circular. A redução da extração de matérias-primas, a eficiência no uso de recursos, a reutilização de produtos, a reciclagem e o aproveitamento de resíduos podem reduzir emissões associadas à produção e ao descarte. Entretanto, os benefícios climáticos devem ser avaliados considerando todo o ciclo de vida dos produtos e processos, evitando que uma determinada solução circular simplesmente transfira impactos ambientais para outra etapa da cadeia.

O ODS 14 (Vida na água) pode ser relacionado à redução da poluição de rios, lagos, zonas costeiras e ambientes marinhos. A melhoria da gestão de resíduos e efluentes reduz a possibilidade de materiais descartados alcançarem os ambientes aquáticos. Na Amazônia, essa relação é especialmente importante diante da extensa rede hidrográfica e da dependência econômica e social de muitas comunidades em relação aos rios.

O ODS 15 (Vida terrestre) apresenta conexão com a conservação dos solos, florestas e biodiversidade. A economia circular pode contribuir para reduzir a pressão sobre recursos naturais quando substitui parte das matérias-primas virgens por materiais recuperados ou quando promove o aproveitamento integral de biomassa. Práticas como compostagem, aproveitamento de resíduos agroindustriais e uso adequado de subprodutos podem contribuir para sistemas produtivos mais eficientes.

Por fim, o ODS 17 (Parcerias e meios de implementação) é transversal às estratégias de economia circular. A circularidade depende da articulação entre governos, universidades, empresas, cooperativas, comunidades, organizações sociais e consumidores. Sem redes de cooperação, tecnologias e conhecimentos desenvolvidos em instituições de pesquisa podem não chegar aos territórios, enquanto resíduos com potencial econômico podem continuar sendo descartados por falta de infraestrutura ou de mercados. Assim, a relação entre economia circular e ODS não deve ser entendida como uma correspondência rígida entre cada prática e determinado objetivo. Uma

mesma ação pode contribuir simultaneamente para vários ODS. A compostagem de resíduos orgânicos, por exemplo, pode reduzir a quantidade de resíduos destinados à disposição final, produzir um insumo agrícola e melhorar a qualidade do solo, relacionando-se potencialmente aos ODS 2, 11, 12, 13 e 15.

1.10.3 Aplicação dos ODS na bioeconomia amazônica

A Amazônia apresenta condições singulares para o desenvolvimento de estratégias integradas de bioeconomia e economia circular. A elevada diversidade biológica, a existência de cadeias baseadas em produtos da sociobiodiversidade e a presença de conhecimentos tradicionais criam oportunidades para a geração de produtos, serviços e processos associados ao uso sustentável dos recursos biológicos.

No Brasil, a Estratégia Nacional de Bioeconomia foi instituída pelo Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024. A política estabelece a bioeconomia como um modelo de desenvolvimento baseado no uso sustentável, na regeneração e na conservação da biodiversidade, associado ao conhecimento científico e tradicional, à inovação, à agregação de valor, à geração de trabalho e renda e à sustentabilidade (Brasil, 2024b).

Essa concepção apresenta forte convergência com os ODS. A valorização sustentável da biodiversidade pode contribuir para o ODS 8, ao gerar trabalho e renda; para o ODS 9, ao estimular inovação e desenvolvimento tecnológico; para o ODS 12, ao promover sistemas produtivos mais eficientes; para o ODS 13, ao apoiar uma economia de baixo carbono; e para o ODS 15, ao incentivar a conservação dos ecossistemas terrestres.

No contexto amazônico, a aplicação prática desses princípios pode ocorrer por meio da valorização dos resíduos e subprodutos gerados pelas próprias cadeias da sociobiodiversidade. O aproveitamento do caroço de açaí, das cascas e sementes de frutos, dos resíduos do processamento de castanhas, de resíduos madeireiros e de outros materiais orgânicos constitui exemplo de como um material anteriormente considerado resíduo pode ser transformado em insumo para novas atividades produtivas.

O caroço de açaí, por exemplo, pode ser direcionado para diferentes rotas de aproveitamento, incluindo produção de biomassa, carvão vegetal, biochar, materiais adsorventes, compostos e outros produtos de interesse agrícola ou industrial. Da mesma forma, resíduos lignocelulósicos provenientes do processamento de produtos florestais e agrícolas podem ser utilizados em processos de produção de energia, materiais, insumos agrícolas e outros produtos de maior valor agregado.

A circularidade dessas cadeias, entretanto, depende da existência de infraestrutura, conhecimento tecnológico, mercados consumidores e mecanismos de organização dos produtores. O simples aproveitamento de um resíduo não garante que determinado processo seja circular ou sustentável. É necessário avaliar o consumo de energia, a geração de emissões, a necessidade de transporte, os custos de processamento, a segurança do produto obtido e seus impactos sobre os ecossistemas.

A agregação de valor local constitui outro elemento importante. Quando resíduos e produtos da biodiversidade são transportados para outras regiões para serem processados, parte significativa do valor econômico pode ser capturada fora dos territórios de origem. O fortalecimento de pequenas agroindústrias, cooperativas, associações e empreendimentos comunitários pode permitir que uma parcela maior desse valor permaneça nas comunidades e municípios amazônicos.

Essa perspectiva é compatível com iniciativas públicas voltadas à valorização das cadeias produtivas sustentáveis. O Fundo Amazônia, por exemplo, identifica entre suas áreas de atuação a agregação de valor de produtos da sociobiodiversidade e o desenvolvimento de tecnologias e atividades produtivas sustentáveis, relacionando essas ações a diferentes ODS (Fundo Amazônia, 2026).

A economia circular aplicada à bioeconomia amazônica deve, portanto, considerar não apenas o fluxo físico dos materiais, mas também a distribuição do valor econômico e social produzido. Uma cadeia pode apresentar elevada eficiência material e, simultaneamente, reproduzir desigualdades caso os benefícios econômicos sejam concentrados em poucos agentes. Por essa razão, a circularidade amazônica precisa estar associada à inclusão produtiva, à valorização do conhecimento local e à participação das comunidades nas decisões sobre o uso dos recursos.

Outro aspecto importante é a articulação entre conhecimento científico e conhecimentos tradicionais. A Estratégia Nacional de Bioeconomia reconhece a importância da integração desses conhecimentos para o desenvolvimento de tecnologias, produtos e processos associados à biodiversidade (Brasil, 2024b). Na Amazônia, essa integração pode favorecer soluções mais adaptadas às condições ambientais, sociais e culturais dos territórios.

Dessa maneira, a bioeconomia amazônica pode ser compreendida como uma importante plataforma para implementação territorial dos ODS, desde que orientada por critérios de sustentabilidade, conservação da biodiversidade, justiça social e agregação de valor local.

1.10.4 Desafios para implementação dos ODS na Amazônia

Apesar das oportunidades existentes, a implementação dos ODS e de estratégias de economia circular na Amazônia enfrenta obstáculos de natureza estrutural, tecnológica, econômica, institucional e social. Um dos principais desafios está relacionado à infraestrutura e logística. As grandes distâncias territoriais, a dependência do transporte fluvial em diversas localidades, a precariedade de determinadas estradas e a dispersão das comunidades podem elevar significativamente os custos de coleta, transporte e processamento de resíduos. Em determinadas situações, o transporte do resíduo até uma unidade de processamento pode consumir recursos e energia suficientes para reduzir a vantagem ambiental inicialmente esperada.

A gestão de resíduos sólidos também representa um desafio relevante. A implementação da economia circular depende de sistemas eficientes de segregação, coleta, transporte, armazenamento e processamento. Quando diferentes materiais são misturados durante a coleta, sua recuperação torna-se mais difícil e economicamente menos atrativa. Assim, políticas de educação ambiental e sistemas de coleta seletiva são elementos fundamentais para criar condições para a circularidade.

Outro obstáculo está relacionado à insuficiência de infraestrutura tecnológica. Muitas soluções para transformação de resíduos em novos produtos demandam equipamentos, laboratórios, profissionais especializados e controle de qualidade. A concentração de estruturas de pesquisa e processamento em determinados centros urbanos pode dificultar a disseminação de tecnologias para áreas mais distantes.

A baixa agregação de valor às cadeias produtivas também constitui uma limitação. A Amazônia possui grande produção de matérias-primas e produtos da biodiversidade, mas parte significativa do processamento e da transformação ocorre fora da região. O fortalecimento da bioeconomia exige investimentos em beneficiamento, armazenamento, processamento, certificação, comercialização e desenvolvimento de novos produtos.

A escassez de financiamento é outro fator limitante. Pequenos produtores, cooperativas e empreendimentos comunitários podem apresentar dificuldade de acesso a crédito para aquisição de equipamentos, adequação sanitária, desenvolvimento tecnológico e ampliação da produção. Instrumentos financeiros específicos são necessários para apoiar iniciativas circulares e reduzir os riscos associados à inovação.

A qualificação profissional também deve ser considerada. A economia circular demanda conhecimentos relacionados a gestão de resíduos, engenharia de processos, agronomia, biotecnologia, química, administração, comercialização e gestão ambiental. A formação de recursos humanos precisa acompanhar a expansão dessas novas cadeias produtivas.

Além disso, existe o desafio da governança territorial. A implementação dos ODS não depende de uma única instituição. Governos municipais, estaduais e federal, universidades, empresas, organizações da sociedade civil, comunidades e consumidores possuem responsabilidades distintas. A ausência de articulação entre esses atores pode resultar em iniciativas isoladas e de baixa capacidade de transformação.

A governança participativa é particularmente relevante na Amazônia. A 1ª Conferência Nacional dos ODS, realizada em 2026, incorporou propostas relacionadas à governança participativa na Amazônia e à transição agroecológica, envolvendo poder público, sociedade civil, setor produtivo, academia e povos e comunidades tradicionais (INPA, 2026). Esse processo evidencia a importância da participação social na construção de políticas alinhadas aos ODS.

Outro desafio é evitar uma visão simplificada da economia circular. Reciclar ou reaproveitar um material não significa necessariamente que todo o sistema produtivo se tornou sustentável. Determinadas tecnologias podem demandar grandes quantidades de energia, água ou produtos químicos. Por isso, análises de ciclo de vida, indicadores ambientais e avaliações de viabilidade econômica e social são fundamentais para selecionar as melhores rotas de aproveitamento.

Também é necessário considerar possíveis trade-offs entre diferentes objetivos. Uma atividade de reciclagem pode gerar emprego e reduzir resíduos, mas apresentar riscos ocupacionais se não houver condições adequadas de segurança. Da mesma forma, o aproveitamento energético de um resíduo pode reduzir sua disposição final, mas não necessariamente será a alternativa ambientalmente mais adequada se houver possibilidade de reutilização ou recuperação do material em uma etapa de maior valor. A implementação dos ODS na Amazônia deve, portanto, ser baseada em estratégias territorialmente adequadas, considerando as características ambientais, sociais, econômicas e culturais de cada localidade.

1.10.5 Perspectivas futuras: economia circular como estratégia para o desenvolvimento sustentável amazônico

A economia circular apresenta potencial para contribuir com uma nova trajetória de desenvolvimento para a Amazônia, especialmente quando articulada à bioeconomia, à inovação tecnológica, à valorização da sociobiodiversidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Essa perspectiva pressupõe uma mudança de visão sobre os resíduos. Em vez de serem considerados exclusivamente materiais sem valor destinados à disposição final, resíduos e subprodutos podem ser avaliados como recursos capazes de retornar aos sistemas produtivos. Essa mudança, entretanto, exige conhecimento técnico para identificar quais materiais apresentam potencial de aproveitamento e quais rotas são ambiental e economicamente viáveis.

O futuro da economia circular amazônica depende, portanto, da capacidade de construir cadeias produtivas territoriais integradas. Em uma cadeia circular, os resíduos de uma atividade podem tornar-se insumos de outra, reduzindo perdas e aumentando a eficiência no uso dos recursos. Resíduos agroindustriais podem retornar à agricultura como composto ou biofertilizante; resíduos lignocelulósicos podem ser transformados em materiais ou bioenergia; subprodutos podem ser utilizados na fabricação de novos produtos; e materiais recicláveis podem retornar à indústria.

A inovação tecnológica terá papel central nesse processo. Universidades, institutos de pesquisa e empresas podem atuar no desenvolvimento de tecnologias para caracterização, processamento e valorização de resíduos. A pesquisa científica também deve contribuir para determinar a segurança, eficiência e sustentabilidade dos produtos obtidos.

A criação de mercados para produtos circulares constitui outro elemento essencial. Mesmo quando uma tecnologia é tecnicamente viável, sua adoção pode ser limitada pela ausência de consumidores, padrões de qualidade ou mecanismos de comercialização. Políticas públicas de compras sustentáveis, certificação, incentivos financeiros e desenvolvimento de mercados podem estimular a demanda por produtos provenientes de cadeias circulares.

A Estratégia Nacional de Economia Circular já incorpora instrumentos voltados à inovação, educação, redução da utilização de recursos, diminuição da geração de resíduos, financiamento, compras públicas e articulação entre diferentes atores. A política também reconhece a importância do desenvolvimento econômico regional por meio de cadeias produtivas de reciclagem e negócios circulares (Brasil, 2024a).

Para a Amazônia, essas diretrizes podem ser adaptadas às especificidades territoriais. Em vez de simplesmente reproduzir modelos desenvolvidos em regiões industrializadas, é necessário desenvolver soluções compatíveis com os sistemas produtivos, a infraestrutura e as características socioambientais amazônicas.

A bioeconomia pode funcionar como uma das principais interfaces entre economia circular e desenvolvimento regional. A valorização sustentável da biodiversidade, associada ao aproveitamento de resíduos e subprodutos, pode ampliar a eficiência das cadeias produtivas e criar novas oportunidades econômicas. O objetivo não deve ser apenas aumentar a exploração econômica dos recursos naturais, mas ampliar o valor gerado a partir de uma utilização responsável, reduzindo perdas e mantendo a capacidade de regeneração dos ecossistemas.

Nesse sentido, a circularidade deve estar associada à conservação da biodiversidade. Uma economia que aumenta a eficiência produtiva, mas estimula a expansão desordenada da exploração

de recursos naturais, não representa necessariamente um modelo sustentável. A regeneração dos ecossistemas precisa permanecer como princípio central.

Outro eixo estratégico é a inclusão social. A transição circular deve gerar oportunidades para agricultores familiares, cooperativas, associações, empreendedores locais, catadores, povos indígenas e comunidades tradicionais, respeitando seus direitos, conhecimentos e formas de organização. O desenvolvimento sustentável amazônico precisa considerar não apenas quanto valor econômico é gerado, mas também quem participa da geração e quem se beneficia desse valor.

A educação ambiental e a formação profissional também serão determinantes. A mudança para padrões circulares depende de mudanças nos comportamentos de consumidores, produtores e gestores públicos. A separação adequada de resíduos, o consumo consciente, o reuso, a redução do desperdício e a valorização de produtos sustentáveis dependem de informação e participação social.

Nesse cenário, os ODS podem funcionar como uma estrutura de orientação e monitoramento. Projetos de economia circular desenvolvidos na Amazônia podem ser planejados considerando quais objetivos pretendem alcançar, quais resultados são esperados e quais indicadores podem demonstrar seus impactos. Essa abordagem permite superar uma visão exclusivamente econômica e avaliar simultaneamente aspectos ambientais e sociais.

Um empreendimento voltado ao aproveitamento de resíduos agrícolas, por exemplo, poderia ser avaliado não apenas pela quantidade de resíduos desviados da disposição final, mas também pela geração de empregos, renda, redução do consumo de matérias-primas, melhoria da qualidade do solo, redução de emissões e participação das comunidades locais. Dessa forma, uma única iniciativa poderia apresentar contribuições para diversos ODS.

A perspectiva futura, portanto, não consiste simplesmente em transformar todos os resíduos em novos produtos. O objetivo mais amplo é construir sistemas econômicos capazes de prevenir desperdícios, preservar recursos, regenerar ecossistemas, gerar valor local e melhorar a qualidade de vida das populações.

Para a Amazônia, essa transição representa uma oportunidade de conciliar conservação ambiental e desenvolvimento econômico, desde que as estratégias sejam territorialmente adequadas, socialmente inclusivas e baseadas em conhecimento científico. A combinação entre economia circular, bioeconomia, inovação e Agenda 2030 pode contribuir para a construção de novas formas de desenvolvimento que valorizem os recursos naturais sem comprometer sua capacidade de regeneração.

Dessa forma, os ODS não devem ser tratados apenas como uma agenda internacional distante da realidade amazônica. Ao contrário, constituem uma referência que pode ser

territorializada por meio de políticas públicas, pesquisas científicas, iniciativas comunitárias e estratégias empresariais. A economia circular, por sua vez, oferece instrumentos para transformar parte desses compromissos em práticas concretas.

A construção de uma Amazônia mais sustentável dependerá, portanto, da capacidade de integrar diferentes escalas e atores: políticas globais, estratégias nacionais, governos estaduais e municipais, instituições de pesquisa, empresas, produtores, comunidades e sociedade civil. A circularidade pode contribuir para essa integração ao conectar fluxos de materiais e recursos às dimensões econômica, ambiental e social do desenvolvimento.

Em síntese, a economia circular apresenta-se como uma estratégia promissora para apoiar a implementação dos ODS na Amazônia, especialmente nos campos da produção e consumo responsáveis, conservação ambiental, inovação, geração de trabalho e renda, gestão de resíduos e valorização da biodiversidade. Seu potencial, entretanto, dependerá da capacidade de superar os desafios de infraestrutura, financiamento, tecnologia, governança e inclusão social. Mais do que uma mudança na forma de lidar com resíduos, a economia circular representa uma oportunidade de repensar os sistemas produtivos amazônicos e construir trajetórias de desenvolvimento capazes de gerar valor econômico sem dissociá-lo da conservação ambiental e do bem-estar social.

1.11 Síntese do capítulo

A economia circular propõe reorganizar os sistemas de produção e consumo para prevenir perdas, conservar valor e regenerar recursos naturais. Sua contribuição vai além da reciclagem e envolve design, durabilidade, manutenção, cooperação entre cadeias, responsabilidade compartilhada e novos modelos econômicos. Os benefícios ambientais e socioeconômicos são relevantes, mas permanecem condicionados à substituição real de recursos virgens, à segurança dos materiais, à redução de impactos e à distribuição justa do valor.

Para a Amazônia, essa abordagem precisa ser territorial. Diversidade de resíduos, sazonalidade, grandes distâncias, infraestrutura desigual, conhecimentos locais e organizações comunitárias influenciam a viabilidade das soluções. O próximo capítulo aprofundará essa relação entre economia circular, bioeconomia e desenvolvimento territorial, preparando a análise dos fluxos residuais que poderão, ou não, ser destinados à produção de biocarvão.

Referências

BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

BRASIL. **Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024**. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia. Brasília, DF: Presidência da República, 2024b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12044.htm. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024.** Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 jun. 2024. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12082.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024**. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. Brasília, DF: Presidência da República, 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12082.htm. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Estratégia Nacional de Economia Circular. Brasília, DF: MDIC, 2024**. Disponível em: https://www.gov.br/mdic/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes-faq/secretaria-de-economia-verde-descarbonizacao-e-bioindustria/o-que-e-a-estrategia-1. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Estratégia Nacional de Bioeconomia. Brasília, DF: MMA, 2024**. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbc/dpeb/estrategia-nacional-de-bioeconomia. Acesso em: 30 ago. 2026.

CORVELLEC, H.; STOWELL, A. F.; JOHANSSON, N. Critiques of the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 421-432, 2022. https://doi.org/10.1111/jiec.13187

FUNDO AMAZÔNIA. **Fundo Amazônia e os ODS. Brasília, DF: BNDES, 2026**. Disponível em: https://www.fundoamazonia.gov.br/pt/monitoramento-e-avaliacao/fundo-amazonia-ods/. Acesso em: 30 ago. 2026.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The circular economy - a new sustainability paradigm?. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

INPA – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA. **Pesquisadoras do Inpa participam de debates e aprovações de propostas na 1ª Conferência Nacional dos ODS**. Manaus: INPA, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/inpa/pt-br/assuntos/noticias/2026/inpa-participa-de-debates-e-aprovacoes-de-propostas-na-1a-conferencia-nacional-dos-ods/. Acesso em: 30 ago. 2026.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

KIRCHHERR, J.; YANG, N. H. N.; SCHULZE-SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M. J.; HARTLEY, K. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 194, art. 107001, 2023. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37-46, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041

MORSELETTO, P. Targets for a circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, art. 104553, 2020. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. **Journal of Business Ethics**, v. 140, n. 3, p. 369-380, 2017. https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2

PAES, M. X.; CAMPOS-SILVA, J. V.; OLIVEIRA, J. A. P. Integrating circular economy in urban Amazon. npj **Urban Sustainability**, v. 1, art. 29, 2021. https://doi.org/10.1038/s42949-021-00031-z

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J. V.; WITJES, S. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 246-264, 2018. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027

SCHROEDER, P.; ANGRAENI, K.; WEBER, U. The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77-95, 2019. DOI: 10.1111/jiec.12732.

STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, p. 435-438, 2016. https://doi.org/10.1038/531435a

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; INTERNATIONAL RESOURCE PANEL. **Global Resources Outlook 2024: bend the trend - pathways to a liveable planet as resource use spikes. Nairobi: UNEP, 2024**. Disponível em: https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024. Acesso em: 28 ago. 2026.

VELENTURF, A. P. M.; PURNELL, P. Principles for a sustainable circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1437-1457, 2021. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018

ZINK, T.; GEYER, R. Circular economy rebound. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 593-602, 2017. https://doi.org/10.1111/jiec.12545

CAPÍTULO 2

BIOECONOMIA E DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL NA AMAZÔNIA: DIVERSIDADE SOCIOECOLÓGICA, CIRCULARIDADE E VALORIZAÇÃO LOCAL

Kalwan Maciel Martins de Jesus
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Michelle do Socorro Cantão dos Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Thayná da Cruz Ferreira
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Luan Gabriel Belém dos Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Joélly Luana Brito Santos
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Antônia Kelly de Abreu Lobo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Mauricio Willians de Lima
Universidade Estadual do Amapá (UEAP)

Yanna Karolynne Pereira da Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Stephanie dos Santos Cunha
Universidade Federal do Pará (UFPA)

DOI: 10.52832/wed.222.1288

A bioeconomia amazônica não pode ser definida apenas pelo uso de biomassa ou pela adoção de novas tecnologias. Para contribuir com a conservação e o bem-estar, ela precisa reconhecer a diversidade dos territórios, proteger direitos, conservar florestas e rios, fortalecer capacidades locais e demonstrar que o valor gerado retorna às populações que mantêm esses sistemas vivos.

2.1 O território como unidade de análise

O território é mais do que uma superfície onde recursos naturais estão disponíveis. Ele reúne ecossistemas, formas de ocupação, relações de poder, instituições, conhecimentos, infraestruturas e vínculos culturais construídos ao longo do tempo. Uma mesma biomassa pode adquirir significados muito diferentes conforme o lugar: pode ser alimento, combustível, cobertura do solo, insumo artesanal, fonte de renda, elemento ritual ou material sem uso conhecido. Por isso, decisões sobre seu aproveitamento não devem partir somente de características físico-químicas.

A abordagem territorial desloca a pergunta de 'qual tecnologia processa este material?' para 'qual problema precisa ser resolvido, por quem e em quais condições?'. Esse deslocamento é decisivo para a economia circular. A disponibilidade técnica de um resíduo não significa disponibilidade social, econômica ou ecológica. Antes de criar uma nova rota, é necessário identificar direitos sobre o recurso, usos existentes, períodos de geração, custos de coleta, funções ambientais e possíveis conflitos entre atores.

Brondizio et al. (2021) mostram que a Amazônia brasileira abriga numerosas iniciativas de sustentabilidade ancoradas em contextos locais, embora muitas permaneçam pouco visíveis nos debates nacionais e internacionais. Essas experiências combinam conhecimentos, organizações e alianças em diferentes escalas. Seu desempenho não pode ser explicado apenas pela tecnologia empregada, pois depende da capacidade de mobilização, da confiança entre os participantes, do acesso a políticas públicas e da conexão com redes de pesquisa, financiamento e mercado.

Londres et al. (2023) aprofundam essa perspectiva ao analisar iniciativas amazônicas localmente enraizadas, diversificadas e articuladas entre escalas. A literatura indica que soluções territoriais ganham robustez quando integram múltiplas atividades, ajustam-se às condições socioecológicas e mantêm conexões externas sem perder o poder de decisão local. Isso não significa isolamento: cooperativas, universidades, governos, empresas e organizações da sociedade civil podem participar, desde que as responsabilidades e os benefícios sejam negociados de forma transparente.

Para este livro, o território será a unidade inicial de diagnóstico dos fluxos residuais. A produção de biocarvão só poderá ser considerada depois de compreender o sistema que gera a

biomassa, suas relações com o solo, a água, a alimentação, a energia e o trabalho. Essa ordem evita que uma solução tecnicamente atraente produza escassez para outros usos, concentre renda ou transfira impactos para comunidades com menor capacidade de influência (Figura 8).

Figura 8 – O território amazônico como unidade integrada de análise e decisão. *O território reúne ecossistemas, conhecimentos, instituições, infraestrutura, atividades produtivas, logística e relações sociais. O diagnóstico territorial deve anteceder a escolha tecnológica e considerar os usos da biomassa, os direitos sobre os recursos, as funções ecológicas e a distribuição dos benefícios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Brondizio et al. (2021) e Londres et al. (2023).

2.2 Amazônias: diversidade socioecológica e produtiva

Usar o termo Amazônia no singular pode ocultar a diversidade interna da região. Florestas de terra firme, várzeas, igapós, savanas, manguezais e áreas de transição respondem de modo diferente às intervenções humanas. Também variam os regimes de chuva, os solos, a navegabilidade, a conectividade e a proximidade dos mercados. Uma estratégia adequada a uma agroindústria periurbana pode ser inviável em uma comunidade acessível apenas por transporte fluvial durante parte do ano.

A diversidade é igualmente social. Povos indígenas, comunidades quilombolas, ribeirinhos, extrativistas, agricultores familiares, assentados, moradores urbanos e empresários organizam a produção e o uso dos recursos segundo objetivos e instituições distintas. Não existe uma única economia amazônica, mas redes que combinam autoconsumo, reciprocidade, mercados locais, contratos empresariais e políticas públicas. Projetos territoriais precisam reconhecer essa pluralidade para não impor uma lógica produtiva incompatível com as formas locais de vida.

A paisagem amazônica tampouco deve ser representada como um espaço historicamente vazio ou intocado. Levis et al. (2017) identificaram efeitos persistentes da domesticação e do manejo pré-colombiano sobre a composição das florestas atuais. Esse conhecimento reforça a longa relação entre sociedades e biodiversidade, mas não autoriza a conversão ou a degradação contemporânea. Ao contrário, evidencia que paisagens manejadas podem conservar alta complexidade quando práticas, instituições e escalas permanecem compatíveis com a dinâmica ecológica.

As cidades fazem parte desse mosaico. Elas concentram população, consumo, serviços, universidades, laboratórios, processamento de alimentos e geração de resíduos. Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) argumentam que a economia circular na Amazônia urbana pode articular gestão de materiais, cadeias da sociobiodiversidade e organizações locais. Essa integração é particularmente importante porque parte significativa da agregação de valor ocorre nos centros urbanos, onde também se encontram equipamentos, assistência técnica e consumidores.

Reconhecer múltiplas Amazônias impede generalizações sobre escala e tecnologia. Unidades centralizadas podem ser adequadas para resíduos concentrados e regulares, enquanto soluções modulares ou comunitárias podem responder melhor a fluxos dispersos e sazonais. Em ambos os casos, a escolha deve considerar capacidade de operação, manutenção, controle ambiental e destino dos produtos. A diversidade territorial não é um obstáculo a ser eliminado, mas uma condição de projeto (Figura 9).

Figura 9 – Diversidade socioecológica, produtiva e infraestrutural das Amazônias. *A região amazônica reúne ambientes, formas de ocupação, sistemas produtivos, meios de transporte e condições de infraestrutura distintos. Florestas de terra firme, áreas inundáveis, manguezais, zonas de transição, comunidades ribeirinhas, agricultura familiar, agroindústrias e centros urbanos demandam estratégias territorialmente diferenciadas.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Levis et al. (2017), Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) e Nobre et al. (2016).

2.3 O que significa bioeconomia?

Bioeconomia é um conceito amplo e disputado. Em sua formulação mais geral, refere-se à produção, ao uso e à conservação de recursos biológicos, conhecimentos, ciência e inovação para gerar bens, processos e serviços. A presença do prefixo 'bio', contudo, não assegura sustentabilidade. Biomassa pode ser renovável e, ainda assim, ser produzida com desmatamento, contaminação, uso intensivo de energia ou concentração fundiária. Por isso, toda definição precisa explicitar objetivos, limites e critérios de avaliação.

Bugge, Hansen e Klitkou (2016), ao revisar a literatura, identificaram três visões recorrentes. A visão biotecnológica enfatiza pesquisa, engenharia e comercialização de processos biológicos; a visão de biorrecursos concentra-se no aproveitamento e na conversão de biomassa; e a visão bioecológica prioriza processos ecológicos, diversidade, circularidade e organização territorial. As três podem coexistir, mas conduzem a prioridades diferentes de investimento, governança e mensuração de resultados.

Vivien et al. (2019) alertam que o conceito de bioeconomia pode ser apropriado por narrativas que tratam a biomassa como substituta suficiente dos recursos fósseis, sem enfrentar os limites materiais e ecológicos. Uma expansão indiscriminada da demanda por matéria biológica pode intensificar a competição por terra, água e nutrientes. A transição, portanto, não consiste apenas em trocar a origem do carbono; ela exige reduzir desperdícios, avaliar necessidades e respeitar a capacidade de regeneração dos ecossistemas.

No Brasil, o Decreto nº 12.044/2024 instituiu a Estratégia Nacional de Bioeconomia e vinculou o conceito à justiça, à ética, à inclusão, à conservação da biodiversidade, ao uso sustentável e regenerativo, à ciência e aos conhecimentos tradicionais. O texto também estabelece diretrizes de respeito aos direitos, prevenção da conversão de vegetação nativa, valorização de diferentes escalas produtivas e repartição de benefícios (Brasil, 2024). Esse marco amplia a bioeconomia para além da oferta de matérias-primas.

Neste livro, bioeconomia designará o conjunto de atividades que mobilizam recursos biológicos, funções ecossistêmicas e conhecimentos para gerar valor econômico e social dentro de limites ecológicos verificáveis. Quando o foco recair sobre protagonismo comunitário, diversidade cultural, direitos e permanência do valor no território, será empregado o termo sociobioeconomia. Essa distinção não cria compartimentos rígidos; ela torna visíveis dimensões que abordagens predominantemente tecnológicas ou mercantis podem deixar em segundo plano.

2.4 Bioeconomia, sociobioeconomia e diferentes trajetórias

As iniciativas bioeconômicas podem seguir trajetórias diferentes e combinar elementos de mais de uma delas. O quadro a seguir é uma ferramenta analítica, não uma classificação definitiva. Ele ajuda a identificar qual problema ocupa o centro da proposta, quem controla o conhecimento e a infraestrutura, como a biomassa é obtida e quais riscos territoriais precisam ser examinados.

Quadro 2 - Trajetórias analíticas da bioeconomia e implicações territoriais

Trajetória	Centro de gravidade	Questões territoriais prioritárias
Biotecnológica	Pesquisa, engenharia biológica, propriedade intelectual e produtos de maior intensidade tecnológica.	Acesso a laboratórios, controle de dados e patentes, biossegurança e repartição dos benefícios.
Biorrecursos	Oferta, processamento e substituição de recursos fósseis por biomassa, alimentos, materiais ou energia.	Origem e escala da biomassa, competição por terra e usos, eficiência logística e limites de extração.
Bioecológica e sociobioeconômica	Diversidade, funções ecossistêmicas, conhecimentos locais, reprodução social e valor territorial.	Direitos, protagonismo comunitário, consentimento, governança, diversidade produtiva e distribuição de renda.
Bioeconomia circular	Prevenção de perdas, cascatas de uso, recuperação de nutrientes e carbono e integração entre cadeias.	Qualidade dos fluxos, usos existentes, segurança, proximidade, substituição efetiva e impactos do ciclo de vida.

Fonte: elaboração própria com base em Bugge, Hansen e Klitkou (2016), Vivien et al. (2019), Garrett et al. (2023) e Rodrigues et al. (2024).

Figura 10 – Trajetórias complementares da bioeconomia em um sistema territorial amazônico. *As trajetórias biotecnológicas, de biorrecursos, bioecológica e sociobioeconômica e de bioeconomia circular podem coexistir e interagir. Sua integração depende de governança territorial, respeito aos limites ecológicos, proteção dos conhecimentos, controle da origem da biomassa e repartição justa dos benefícios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Bugge, Hansen e Klitkou (2016), Vivien et al. (2019) e Rodrigues et al. (2024).

A trajetória biotecnológica pode desenvolver fármacos, enzimas, materiais e métodos de rastreabilidade de grande relevância. Seu risco aparece quando organismos, dados ou conhecimentos são separados das relações sociais que permitiram sua identificação e uso. A trajetória de biorrecursos pode substituir insumos fósseis e criar mercados, mas precisa demonstrar que a oferta de biomassa não estimula conversão de habitats nem desloca alimentos e funções ecológicas.

A perspectiva sociobioeconômica enfatiza que floresta, rio, cultura e organização social formam um sistema inseparável. Rodrigues et al. (2024) propõem integrar dimensões sociais, bioterritoriais, econômicas e de tecnologia social, destacando liderança, redes horizontais de conhecimento e adaptação tecnológica. Já a bioeconomia circular organiza os fluxos para prevenir perdas e encadear usos. Na prática, uma iniciativa consistente pode reunir ciência avançada, manejo comunitário e circularidade, desde que sua governança impeça a subordinação de uma dimensão às demais.

O termo sociobioeconomia também funciona como um lembrete político: produzir valor não é suficiente; importa saber quem define as prioridades, assume os riscos, controla a infraestrutura e recebe os benefícios. Uma cadeia pode comercializar um produto nativo e ainda reproduzir relações assimétricas, preços injustos ou dependência tecnológica. A origem biológica do produto não corrige automaticamente a estrutura de poder da cadeia.

2.5 Floresta em pé, rios fluindo e limites ecológicos

A inovação amazônica não começa apenas em laboratórios. Sistemas agrícolas, manejo de espécies, processamento de alimentos, uso de plantas e leitura dos ciclos hidrológicos resultam de conhecimentos acumulados por gerações. Esses saberes não devem ser tratados como um banco gratuito de informações a ser extraído. Eles pertencem a relações coletivas, territórios e responsabilidades, e sua utilização precisa respeitar as formas próprias de decisão e transmissão.

A Lei nº 13.123/2015 regula o acesso ao patrimônio genético e ao conhecimento tradicional associado, reconhece o consentimento prévio informado em situações previstas e estabelece mecanismos de repartição de benefícios (Brasil, 2015). O cumprimento formal da lei é um patamar mínimo. Relações éticas exigem comunicação compreensível, tempo para deliberação, reconhecimento de autoria, proteção de conhecimentos sensíveis e possibilidade real de recusar ou modificar o projeto.

Ciência e conhecimentos tradicionais não precisam ser colocados em uma hierarquia única. A pesquisa pode caracterizar materiais, medir emissões, avaliar toxicidade e comparar resultados; o conhecimento territorial pode indicar sazonalidade, usos existentes, sinais ecológicos e formas

legítimas de organização. A integração é produtiva quando cada sistema de conhecimento participa da formulação das perguntas e da interpretação dos resultados, e não apenas da coleta de dados.

Tecnologia social é especialmente relevante nesse encontro. Rodrigues et al. (2024) destacam soluções desenvolvidas ou adaptadas com participação dos usuários e orientadas a problemas concretos. No caso do biocarvão, isso pode significar ajustar o equipamento ao combustível disponível, à escala do resíduo, à capacidade de manutenção e aos controles de segurança. Uma máquina eficiente em laboratório pode fracassar se depender de peças inacessíveis, operação contínua incompatível com a sazonalidade ou instrumentos que a equipe não consegue calibrar.

A cooperação com universidades e institutos de pesquisa pode ampliar a qualidade e reduzir riscos, desde que inclua formação local e devolução dos resultados. Protocolos simples de amostragem, registros de lote, materiais didáticos, laboratórios de referência e assistência técnica continuada ajudam a transformar dados em capacidade territorial. Inovação, nesse sentido, não é somente introduzir um equipamento; é construir autonomia para decidir, operar, avaliar e aperfeiçoar o sistema.

2.6 Cadeias da sociobiodiversidade e agregação de valor

As cadeias da sociobiodiversidade articulam produtos, serviços e conhecimentos associados à biodiversidade e aos modos de vida de povos e comunidades. Frutos, sementes, óleos, fibras, pescados e ingredientes podem gerar renda e fortalecer a conservação quando o manejo é sustentável e o valor permanece no território. Entretanto, a existência de demanda por um produto nativo não garante, por si só, desenvolvimento inclusivo.

A revisão sistemática de Rosenfeld et al. (2024) sobre produtos florestais não madeireiros na Amazônia brasileira encontrou potencial, mas também resultados heterogêneos e limitações de evidência. Cadeias dependem de acesso a mercados, organização, assistência, infraestrutura, preços, regras de manejo e distribuição do valor. A expectativa de que a comercialização de produtos florestais produzirá automaticamente conservação e melhoria de renda deve ser substituída por avaliação empírica.

Clement et al. (2024), ao discutir uma bioeconomia amazônica baseada em alimentos florestais, apontam desafios de demanda, trabalho, mercados e políticas públicas. O aumento da produção pode pressionar mão de obra em comunidades pequenas, estimular simplificação dos sistemas ou tornar produtores dependentes de compradores. Diversificar produtos e canais de comercialização pode aumentar a resiliência, mas exige coordenação e controle de qualidade.

Agregar valor não se limita a transformar fisicamente a matéria-prima. Classificação, armazenamento, identidade territorial, rastreabilidade, certificação, desenho, logística, informação e acesso a mercados também criam valor. Se todas essas funções são realizadas fora da região, o território pode permanecer como fornecedor de matéria-prima de baixo preço. A estratégia territorial deve identificar quais etapas podem ser internalizadas com segurança e eficiência e quais requerem parcerias externas equilibradas.

Os resíduos dessas cadeias integram o mesmo sistema. O beneficiamento de frutos pode concentrar caroços, cascas e fibras em cooperativas ou agroindústrias, criando uma oportunidade circular. Antes de convertê-los em biocarvão, é necessário verificar usos atuais, custos de secagem e armazenamento, risco de decomposição, contaminação e demanda pelo produto carbonizado. A valorização do fluxo secundário deve fortalecer a atividade principal, e não transferir recursos ou riscos para um novo empreendimento desconectado (Figura 11).

Figura 11 – Cadeia territorial da sociobiodiversidade e permanência do valor na Amazônia. *A agregação territorial de valor envolve manejo sustentável, classificação, armazenamento, processamento, rastreabilidade, controle de qualidade, desenvolvimento de produtos, organização comunitária e acesso a mercados. Conhecimento, formação, equipamentos, dados e benefícios econômicos devem retornar ao território.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Garrett et al. (2023), Rodrigues et al. (2024), Rosenfeld et al. (2024) e Clement et al. (2024).

2.7 Infraestrutura, logística, escala e capacidades locais

A viabilidade de uma bioeconomia territorial depende de infraestrutura material e institucional. Energia confiável, água, conectividade, transporte, armazenamento, laboratórios, oficinas, crédito, assistência técnica e serviços públicos condicionam a continuidade das atividades. A ausência desses elementos não é um detalhe externo ao modelo de negócio; ela altera custos, qualidade, segurança e poder de negociação.

Na Amazônia, longas distâncias e variações sazonais de acesso tornam especialmente oneroso transportar materiais volumosos, úmidos e de baixo valor. A densificação ou o processamento próximo da origem pode reduzir parte desse custo, mas demanda equipamentos e controle local. A centralização pode oferecer escala e padronização, enquanto a descentralização pode reduzir deslocamentos e ampliar participação. Nenhuma configuração é superior em todos os casos.

A escala deve acompanhar o fluxo real, e não apenas a capacidade nominal do equipamento. Uma unidade dimensionada para o pico da safra pode permanecer ociosa durante meses; uma unidade pequena pode gerar filas, deterioração e perdas. Inventários mensais, testes de umidade, densidade aparente, distância e tempo de armazenamento permitem construir cenários realistas. Combinar resíduos de diferentes origens pode estabilizar a oferta, mas aumenta a complexidade de rastreabilidade e qualidade.

O custo de manutenção merece atenção equivalente ao investimento inicial. Peças, refratários, sensores, mão de obra especializada e paradas não planejadas podem comprometer a operação. Tecnologias mais simples podem ser preferíveis quando oferecem controle ambiental suficiente e podem ser reparadas localmente. Em contrapartida, simplicidade não justifica exposição à fumaça, risco de incêndio ou emissões descontroladas.

Capacidade local inclui competências administrativas e de governança. Registros de produção, contratos, compras, vendas, licenças, controle de lotes e prestação de contas são necessários para acessar mercados e demonstrar resultados. Projetos-piloto deve reservar recursos para formação e acompanhamento, evitando que toda a capacidade técnica desapareça quando termina o financiamento. Infraestrutura durável é aquela que combina equipamento, pessoas, procedimentos e instituições.

2.8 Governança, direitos e repartição de benefícios

Governança define quem participa das decisões, quais regras orientam o acesso aos recursos, como conflitos são resolvidos e de que maneira custos e benefícios são distribuídos. Em cadeias bioeconômicas, essas questões aparecem desde a coleta da biomassa até o uso de dados, marcas e tecnologias. Uma boa governança não é um complemento social acrescentado depois da definição técnica; ela integra a própria viabilidade do sistema.

Direitos territoriais e autodeterminação estabelecem limites para a atuação de empresas, pesquisadores e governos. Consultas precisam ocorrer antes das decisões relevantes, com informação acessível e respeito às instituições representativas dos povos e comunidades. Consentimento não pode ser reduzido à assinatura de um documento. Ele envolve processo,

possibilidade de negociação e capacidade de interromper atividades que deixem de cumprir as condições pactuadas.

A repartição de benefícios pode assumir formas monetárias e não monetárias: pagamento justo, participação nos resultados, formação, infraestrutura comunitária, acesso a tecnologias, coautoria, dados e fortalecimento institucional. O mecanismo adequado depende do tipo de recurso e conhecimento mobilizado. A legislação sobre patrimônio genético e conhecimento tradicional estabelece obrigações específicas, mas cadeias que não se enquadram diretamente nessas hipóteses também devem adotar critérios de justiça distributiva.

Transparência de preços e custos reduz assimetrias. Produtores precisam conhecer padrões de qualidade, descontos, riscos e destino do material. Contratos devem indicar propriedade dos equipamentos e produtos, responsabilidades ambientais, condições de exclusividade e procedimentos para eventos imprevistos. Quando uma comunidade fornece resíduos para produção de biocarvão, também deve estar claro quem responde pela segurança do processo, pelo controle de contaminantes e por eventuais danos na aplicação.

Indicadores de governança devem acompanhar os indicadores de produção. Participação de mulheres e jovens, representação nos conselhos, tempo de pagamento, estabilidade dos contratos, distribuição da renda, resolução de conflitos e satisfação dos participantes ajudam a revelar resultados que o volume processado não mostra. A bioeconomia será territorialmente relevante quando ampliar capacidades e opções, e não quando criar uma nova dependência de um único comprador, equipamento ou financiador.

2.9 Critérios territoriais para iniciativas circulares e biocarvão

A passagem do conceito para a prática exige um diagnóstico anterior ao investimento. Os critérios abaixo organizam perguntas que devem ser respondidas por dados locais, participação dos atores e ensaios progressivos. Eles não substituem estudos ambientais, licenciamento, normas de segurança ou análise de viabilidade, mas reduzem o risco de escolher a tecnologia antes de compreender o território.

1. Origem e função ecológica. Identificar onde a biomassa é gerada, como foi produzida e quais funções desempenha. Materiais associados a desmatamento, degradação ou retirada excessiva não se tornam sustentáveis ao serem convertidos. Deve-se preservar a fração necessária à cobertura do solo, à ciclagem de nutrientes e a outros processos ecológicos.

2. Usos existentes e direitos. Mapear usos alimentares, energéticos, agrícolas, artesanais, culturais e comerciais, bem como direitos de acesso e decisão. A categoria 'resíduo' deve ser validada com

quem produz e utiliza o material. Um novo mercado não pode retirar recursos essenciais ou ignorar acordos comunitários.

3. Volume, qualidade e sazonalidade. Medir geração por período, umidade, densidade, composição, mistura e contaminação. Médias anuais isoladas escondem picos e intervalos. Amostragens de diferentes lotes orientam o dimensionamento, o armazenamento e os testes de conversão.

4. Logística e escala. Calcular distâncias, rotas, meios de transporte, perdas e acessibilidade ao longo do ano. Comparar processamento centralizado, descentralizado e móvel, considerando a densificação do material e o retorno do produto ao local de uso.

5. Energia, emissões e segurança. Estimar energia de secagem e operação, origem do combustível, recuperação de calor e controle de gases, partículas, incêndios e exposição ocupacional. A eficiência deve ser avaliada no sistema completo, e não somente no reator.

6. Processo, produto e qualidade. Definir finalidade do biocarvão e parâmetros coerentes com ela. Matéria-prima, temperatura e tempo de residência influenciam carbono, cinzas, pH, nutrientes, porosidade e contaminantes. Lotes devem ser rastreáveis e analisados antes da aplicação.

7. Mercado e demanda comprovada. Identificar usuários, requisitos, preço, volume e alternativas concorrentes. Produzir antes de validar a função e o comprador pode apenas transformar um resíduo de biomassa em estoque de material carbonizado sem uso seguro.

8. Governança e repartição de benefícios. Definir participantes, propriedade, responsabilidades, contratos, decisão sobre dados e distribuição do valor. A organização deve incluir mecanismos de prestação de contas, tratamento de conflitos e participação de grupos frequentemente excluídos.

9. Comparação com alternativas. Comparar prevenção, redução na origem, alimentação animal quando segura, cobertura do solo, compostagem, digestão anaeróbia, materiais, energia e outras rotas. O biocarvão deve ser selecionado quando apresentar melhor combinação territorial de desempenho ambiental, social, técnico e econômico.

O diagnóstico pode ser conduzido por etapas. Uma triagem elimina fluxos incompatíveis; ensaios de bancada verificam comportamento e qualidade; um piloto testa logística, operação e uso; somente depois se avalia a expansão. Em cada fase, critérios de interrupção precisam ser definidos. Resultados negativos não representam fracasso científico: evitam investimentos inadequados e orientam alternativas melhores (Figura 12).

Figura 12 – Diagnóstico progressivo para implantação territorial de uma iniciativa de biocarvão. *A implantação começa pelo inventário territorial da biomassa, dos usos existentes, dos direitos, da sazonalidade e da logística. Análises laboratoriais antecedem os ensaios de bancada, o projeto-piloto com controle de emissões e segurança e a aplicação monitorada no campo. A expansão ocorre somente quando os resultados ambientais, técnicos, econômicos e sociais são satisfatórios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Garrett et al. (2023), Rodrigues et al. (2024) e nos critérios territoriais sistematizados neste capítulo.

A avaliação deve construir uma linha de base. Sem conhecer o destino atual do resíduo, as emissões, os custos e os benefícios existentes, não é possível atribuir mudanças ao projeto. Indicadores absolutos e por unidade funcional, análise do ciclo de vida, balanço de carbono, avaliação econômica e acompanhamento social serão aprofundados nos capítulos seguintes. A rastreabilidade territorial conectará esses métodos à origem real dos materiais.

Esse conjunto de critérios também delimita a relação entre economia circular e bioeconomia. A circularidade organiza a prevenção e a retenção de valor; a bioeconomia situa os recursos biológicos e os processos de inovação; a abordagem territorial estabelece direitos, limites, capacidades e objetivos locais. O biocarvão encontra espaço na interseção desses campos, mas apenas quando sua produção e seu uso satisfazem simultaneamente as três perspectivas.

2.10 Síntese do capítulo

A Amazônia reúne sistemas socioecológicos diversos, historicamente manejados e conectados por relações que não podem ser reduzidas à oferta de biomassa. Uma bioeconomia coerente com a região deve conservar florestas e rios, respeitar direitos, articular ciência e conhecimentos tradicionais, fortalecer organizações locais e distribuir valor de modo justo. A sociobioeconomia torna essas dimensões explícitas e ajuda a avaliar quem controla as decisões e os benefícios.

Infraestrutura, logística, sazonalidade e capacidade institucional condicionam a escala das iniciativas. Para resíduos e biocarvão, o diagnóstico territorial deve preceder a escolha tecnológica e comparar usos existentes e alternativas. O próximo capítulo examinará os principais resíduos amazônicos, sua geração, caracterização e riscos, fornecendo a base material para selecionar fluxos que poderão seguir para conversão termoquímica.

Referências

BRASIL. Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015. Dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético, sobre a proteção e o acesso ao conhecimento tradicional associado e sobre a repartição de benefícios. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 maio 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13123.htm Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jun. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12044.htm Acesso em: 28 ago. 2026.

BRONDIZIO, E. S. et al. Making place-based sustainability initiatives visible in the Brazilian Amazon. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 49, p. 66-78, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.03.007

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. **Sustainability**, v. 8, n. 7, art. 691, 2016. https://doi.org/10.3390/su8070691

CLEMENT, C. R.; PEREIRA, H. S.; VIEIRA, I. C. G.; HOMMA, A. K. O. Challenges for a Brazilian Amazonian bioeconomy based on forest foods. **Trees, Forests and People**, v. 16, art. 100583, 2024. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100583

GARRETT, R. D. et al. **Supporting socio-bioeconomies of healthy standing forests and flowing rivers in the Amazon. New York: Science Panel for the Amazon, 2023**. Disponível em: https://www.theamazonwewant.org/wp-content/uploads/2023/08/230811-PB-Bioeconomy-EN-approved2.pdf Acesso em: 28 ago. 2026.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, art. eabp8622, 2023. https://doi.org/10.1126/science.abp8622

LEVIS, C. et al. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, v. 355, n. 6328, p. 925-931, 2017. https://doi.org/10.1126/science.aal0157

LONDRES, M. et al. Place-based solutions for global social-ecological dilemmas: an analysis of locally grounded, diversified, and cross-scalar initiatives in the Amazon. **Global Environmental Change**, v. 82, art. 102718, 2023. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102718

NOBRE, C. A. et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016. https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113

PAES, M. X.; CAMPOS-SILVA, J. V.; OLIVEIRA, J. A. P. Integrating circular economy in urban Amazon. **npj Urban Sustainability**, v. 1, art. 29, 2021. https://doi.org/10.1038/s42949-021-00031-z

QIN, Y. et al. Forest conservation in Indigenous territories and protected areas in the Brazilian Amazon. **Nature Sustainability**, v. 6, p. 295-305, 2023. https://doi.org/10.1038/s41893-022-01018-z

RODRIGUES, D. C.; RIBEIRO, A. S.; SILVA, J. P. S.; PASSADOR, C. S. Sociobioeconomy and social technology in the Amazon region: an integrated framework proposition. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 28, n. 6, art. e240223, 2024. https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2024240223.en

ROSENFELD, T.; POKORNY, B.; MARCOVITCH, J.; POSCHEN, P. Bioeconomy based on non-timber forest products for development and forest conservation - untapped potential or false hope? A systematic review for the Brazilian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 163, art. 103228, 2024. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103228

VIVIEN, F.-D.; NIEDDU, M.; BEFORT, N.; DEBREF, R.; GIAMPIETRO, M. The hijacking of the bioeconomy. **Ecological Economics**, v. 159, p. 189-197, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.027

CAPÍTULO 3

RESÍDUOS AMAZÔNICOS: GERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E CRITÉRIOS PARA APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL

Luan Gabriel Belém dos Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Michelle do Socorro Cantão dos Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Paulo Ricardo de Carvalho Esquerdo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Amanda Santos Araújo
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Pedro Lucas Magno Bulhões
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1289

Este capítulo trata os resíduos amazônicos como fluxos materiais heterogêneos, situados em processos produtivos e territórios específicos. A possibilidade de aproveitamento depende de origem, quantidade efetivamente disponível, qualidade, riscos, logística e usos concorrentes. O objetivo não é montar um catálogo de biomassas promissoras, mas oferecer um método para reconhecer quais fluxos podem ser valorizados com segurança e quais devem permanecer em outras rotas de manejo.

3.1 De "resíduo" a fluxo material caracterizado

A palavra, resíduo, costuma sugerir um material sem valor, homogêneo e prontamente disponível. Na prática, ela reúne situações muito diferentes: cascas separadas durante o beneficiamento de frutos, serragem misturada com solo, restos de alimentos, lodo, madeira tratada, embalagens, cinzas e materiais que ainda desempenham funções ecológicas ou econômicas. A classificação administrativa é necessária para definir responsabilidades, mas não substitui a descrição física, química, sanitária e territorial do fluxo.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos distingue resíduo sólido de rejeito. O primeiro pode demandar destinação envolvendo reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou outras soluções admitidas; o rejeito é a fração para a qual, depois de esgotadas as possibilidades técnica e economicamente viáveis, resta a disposição final ambientalmente adequada. A mesma política estabelece uma ordem de prioridade que começa pela não geração e redução, antes da reutilização, reciclagem, tratamento e disposição de rejeitos (BRASIL, 2010; BRASIL, 2022).

Para a análise de aproveitamento, quatro quantidades precisam ser separadas. A geração teórica é estimada com base no volume de produção e em coeficientes de geração de resíduos. A geração medida corresponde à massa realmente registrada no processo. A quantidade coletável desconta perdas e limitações de acesso. Por fim, a disponibilidade sustentável desconta usos existentes, funções ecológicas, frações contaminadas e volumes cuja remoção criaria impactos maiores que os benefícios esperados. Confundir essas grandezas pode ocasionar o superdimensionamento de unidades de processamento e a disputa por materiais que nunca estiveram efetivamente ociosos (Figura 13).

Figura 13. Da geração teórica à disponibilidade sustentável de um fluxo residual amazônico. *A quantidade inicialmente estimada é sucessivamente ajustada pela medição no processo, pelas limitações de acesso e coleta, pelos usos existentes, pelas funções ecológicas e pela segregação de frações contaminadas. A disponibilidade sustentável corresponde apenas ao material limpo, acessível e cuja remoção não produz impactos superiores aos benefícios esperados.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010; Brasil, 2022) e nos critérios metodológicos discutidos neste capítulo.

A denominação de coproduto pode ser adequada quando o fluxo possui especificação, mercado, controle de qualidade e uso regular. Entretanto, mudar o nome não elimina riscos nem obrigações. Um material somente se torna um insumo confiável quando existe conhecimento sobre sua origem, composição, variabilidade e destino. Para os fins deste livro, a expressão biomassa residual designa a fração biogênica remanescente de um processo, sem presumir que ela esteja livre de contaminação ou que a conversão termoquímica seja necessariamente sua melhor rota de aproveitamento.

A unidade de análise deve ser o sistema que gera e utiliza o material. Isso exige localizar o ponto de geração, identificar quem o controla, registrar o processo anterior, descrever o destino atual e acompanhar as operações de coleta, armazenamento, transporte e transformação. O enfoque por fluxo material evita duas simplificações recorrentes: considerar toda biomassa como renovável por definição e considerar todo aproveitamento como circular apenas por reduzir o descarte.

3.2 Inventário de geração e disponibilidade

Um inventário robusto começa pelo diagrama do processo produtivo. Para cada etapa, registram-se entradas, produto principal, perdas, efluentes, emissões, frações sólidas e recirculações. O balanço de massa ajuda a detectar omissões: em um período definido, a massa de

entradas deve ser reconciliada com produtos, estoques e saídas, considerando a água incorporada ou removida. Pesagens diretas são preferíveis; quando não forem possíveis, estimativas baseadas em volume precisam utilizar a densidade aparente medida para cada condição do material.

Coeficientes publicados podem orientar uma triagem, mas não devem substituir medições locais. Variedade biológica, maturidade, umidade, regulagem do equipamento, eficiência do beneficiamento e práticas do operador alteram a proporção residual. Um coeficiente obtido em uma indústria mecanizada pode ser inadequado para uma unidade comunitária, assim como valores de uma única safra não representam necessariamente o restante do ano. O inventário deve documentar a incerteza e a origem de cada dado.

A sazonalidade deve ser registrada em escala compatível com a operação pretendida. Médias anuais escondem picos de poucos meses, períodos de acesso fluvial restrito e interrupções do processamento. Séries semanais ou mensais permitem estimar capacidade de armazenamento, tempo de permanência, número de turnos e ociosidade do equipamento. Eventos extremos, falhas de energia, mudança de comprador e variações de preço também devem compor os cenários, pois modificam o fluxo e seus usos concorrentes.

A amostragem é parte do inventário, e não uma etapa posterior. Pilhas de cavacos, caroços ou composto podem apresentar gradientes de umidade, granulometria e decomposição. A amostra composta deve reunir incrementos de diferentes posições, momentos e lotes, com identificação de data, origem e condições de armazenamento. Sem um plano de amostragem, a precisão instrumental do laboratório apenas produz um número exato para uma amostra que pode não representar o material real.

O cadastro mínimo de cada fluxo deve incluir: gerador e localização; processo e matéria-prima de origem; massa gerada por período; teor de umidade; forma física; destino atual; preço ou custo de manejo; distância; modo de transporte; duração e condição de armazenamento; evidências de contaminação; responsável pelo lote; e usos existentes. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos reconhece a necessidade de diagnósticos que informem origem, volume e características dos resíduos, além de sistemas de rastreabilidade e inventários que apoiem o planejamento (Brasil. Ministério Do Meio Ambiente, 2022) (Figura 14).

Figura 14 – Inventário, amostragem e logística de um fluxo residual em território amazônico. *O inventário integra o processo gerador, a pesagem direta, o balanço de massa, a formação de amostra composta em diferentes posições da pilha, a identificação dos lotes, o armazenamento segregado e as rotas rodoviária e fluvial. A representação também evidencia que sazonalidade, umidade e condições de acesso influenciam a quantidade efetivamente coletável e a regularidade do fornecimento.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2022) e no protocolo de inventário apresentado neste capítulo.

3.3 Resíduos agroindustriais e da sociobiodiversidade

As cadeias de frutos, sementes, óleos, farinhas, bebidas e outros produtos da sociobiodiversidade geram fluxos em diferentes lugares. Parte permanece na área de coleta ou cultivo; parte é concentrada em casas de farinha, batedores, cooperativas e agroindústrias. Essa concentração pode facilitar a coleta, mas também aumenta rapidamente a demanda por espaço, secagem e controle sanitário. Resíduos sólidos e líquidos provenientes do mesmo processo não devem ser reunidos em uma única categoria, pois exigem tecnologias e controles distintos.

O beneficiamento do açaí é um caso emblemático. Caroço, endocarpo e fibras formam um material lignocelulósico, mas sua proporção, granulometria e umidade dependem da espécie, do equipamento e do preparo. Barbosa et al. (2019) caracterizaram partículas de resíduos de *Euterpe oleracea* e *Euterpe precatoria* e demonstraram que densidade, umidade, lignina, celulose, extrativos e comportamento térmico precisam ser conhecidos para orientar o processamento. O estudo também evidencia que diferentes frações granulométricas não são equivalentes.

Ensaios de pirólise com resíduos da agroindústria do açaí confirmam que a temperatura e o tempo de residência modificam o rendimento e as propriedades do material carbonizado (SATO et al., 2019). Em trabalho posterior, Sato et al. (2020) observaram respostas químicas do solo à aplicação de biocarvões produzidos com caroços e fibras de açaí. Esses resultados demonstram potencial, mas não autorizam extrapolação automática para qualquer lote, solo, cultivo ou

equipamento. A matéria-prima deve ser caracterizada e o produto precisa ser testado para a finalidade pretendida.

As cascas de cupuaçu ilustram a importância de comparar rotas. Marasca et al. (2022) analisaram processos de hidrólise e pirólise e identificaram açúcares, compostos de interesse químico e potencial energético. O achado não significa que toda casca deva ser pirolisada; significa que sua composição abre alternativas de biorrefinaria cuja escolha depende da escala, pureza, mercado, energia e capacidade técnica. A extração de compostos ou a produção de materiais pode preservar mais valor que a simples conversão energética.

Os resíduos da castanha-do-brasil também apresentam frações lenhosas de interesse. Em amostras coletadas em Castanhal, Pará, Leandro et al. (2019) encontraram elevado teor de lignina e baixo teor de cinzas, características compatíveis com diferentes usos energéticos e carbonosos. Ainda assim, ouriços, cascas e partículas de beneficiamento possuem tamanhos, dureza e locais de geração distintos. O custo de coleta e trituração pode ser tão decisivo quanto a composição química.

Cacau, mandioca, dendê, coco, babaçu, buriti, tucumã e outras cadeias geram cascas, fibras, tortas, cachos, engaços e efluentes. Entretanto, uma lista extensa de espécies pouco acrescenta sem dados específicos de cada unidade produtiva. Para cada fluxo, deve-se perguntar se existem frações alimentares ou bioativas recuperáveis, possibilidade de uso seguro na alimentação animal, retorno agronômico, emprego artesanal ou material, possibilidade de compostagem ou digestão e, somente então, conveniência de rotas termoquímicas.

A separação na origem determina grande parte do valor. Solo, areia, embalagens, metais, água de lavagem, óleo lubrificante e produtos de limpeza elevam o teor de cinzas ou introduzem contaminantes. Procedimentos simples — recipientes identificados, piso limpo, cobertura, retirada de corpos estranhos e registro de lote — podem produzir ganho de qualidade maior que um tratamento complexo aplicado depois da mistura.

3.4 Resíduos florestais e do processamento da madeira

A categoria, resíduo madeireiro, reúne materiais com origens e funções muito diferentes. Na floresta, copas, galhos, cascas e partes danificadas permanecem após a exploração. Na indústria primária, surgem costaneiras, pontas, aparas, cavacos, serragem e pó. Em marcenarias e obras, aparecem recortes, painéis reconstituídos, madeira pintada ou preservada. A rota ambientalmente adequada muda de acordo com essa trajetória.

Resíduos deixados na área de manejo participam da ciclagem de nutrientes, oferecem micro-hábitats e protegem o solo. Sua retirada também exige operações adicionais e pode ampliar

danos. Numazawa et al. (2017), ao analisarem dois níveis de intensidade de exploração madeireira na Amazônia brasileira, mostraram que os resíduos de colheita são relevantes para o balanço de carbono do sistema. Portanto, o volume encontrado no chão da floresta não deve ser contabilizado integralmente como matéria-prima disponível.

Nos pátios de serraria, a concentração espacial tende a facilitar o aproveitamento. Contudo, espécies tropicais diferem em densidade, extrativos, lignina, cinzas e comportamento térmico. Morais et al. (2021) caracterizaram resíduos finos de quinze espécies amazônicas e destacaram a influência da umidade e das propriedades específicas sobre o desempenho energético. Misturas não controladas podem variar entre os lotes e produzir biocarvões com composição inconsistente.

A origem legal da madeira é um critério anterior ao desempenho tecnológico. A transformação de resíduos não pode legitimar a exploração ilegal nem criar incentivo para aumentar o abate. Cadeia de custódia, documentos florestais, identificação do fornecedor e conciliação entre volume de tora, produto e resíduo devem integrar a rastreabilidade. A alegação de benefício climático ou circular perde fundamento quando a matéria-prima está associada ao desmatamento ou à degradação evitável.

Madeira limpa e não tratada pode ser direcionada a reparo, componentes, painéis, briquetes, calor de processo ou conversão termoquímica, conforme sua qualidade e demanda. Madeira pintada, colada, laminada ou preservada precisa de identificação específica: adesivos, revestimentos, metais e preservantes podem gerar emissões e concentrar contaminantes no sólido carbonizado. Misturar esses materiais com serragem limpa elimina opções e eleva o custo de controle.

3.5 Resíduos sólidos urbanos no contexto amazônico

Os resíduos sólidos urbanos combinam matéria orgânica, papel, plásticos, vidro, metais, têxteis, rejeitos sanitários e materiais de limpeza urbana. Sua composição varia com renda, hábitos, turismo, estação do ano, cobertura da coleta e metodologia de amostragem. Por isso, dados nacionais não devem ser aplicados diretamente a um município amazônico sem gravimetria local e descrição do sistema de coleta.

A Pesquisa de Informações Básicas Municipais de 2023 mostrou a permanência de vazadouros a céu aberto em parcela expressiva dos municípios brasileiros e desigualdades regionais acentuadas (IBGE, 2024). Na Amazônia, grandes distâncias, baixa densidade populacional fora dos principais centros, dependência do transporte fluvial, sazonalidade hidrológica e concentração dos mercados recicladores ampliam os custos. Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) defendem que a circularidade urbana amazônica precisa ser integrada ao planejamento territorial e às condições sociais da região.

Em Humaitá, Manicoré e Ariquemes, Oliveira et al. (2021) identificaram barreiras financeiras, técnicas, logísticas e institucionais. O painel de especialistas do estudo priorizou prevenção, compostagem da fração orgânica e reciclagem da fração seca, com inclusão de cooperativas e adoção de soluções intermunicipais. O resultado reforça que não existe justificativa para encaminhar resíduos urbanos misturados diretamente a uma unidade de pirólise sob o argumento genérico de recuperação.

A fração orgânica segregada na origem é normalmente mais adequada à prevenção de perdas alimentares, à redistribuição quando segura, à compostagem ou à digestão anaeróbia. O alto teor de água reduz a eficiência dos processos térmicos e favorece a decomposição durante a espera. Poda urbana e madeira limpa podem apresentar maior afinidade com rotas termoquímicas, desde que estejam separadas e não contenham solo, plásticos, tintas, pregos ou resíduos de varrição.

A coleta seletiva deve reconhecer o trabalho de catadoras e catadores. Equipamentos que consomem materiais recicláveis de maior valor podem competir com a renda dessas organizações e reduzir a recuperação material. O diagnóstico precisa registrar quem coleta, separa e comercializa cada fração, as condições de trabalho e a distribuição do valor. A tecnologia é parte do sistema público de limpeza urbana e não substitui contratos, educação, fiscalização, inclusão social e disposição final segura para os rejeitos (Figura 15).

Figura 15 – Heterogeneidade e separação na origem dos resíduos amazônicos. *Fluxos agroindustriais, madeireiros e urbanos apresentam diferenças de origem, umidade, granulometria, composição e risco. A separação física entre caroços, cascas, fibras, resíduos alimentares, poda, madeira limpa e materiais suspeitos preserva a qualidade das frações aproveitáveis e impede que plásticos, metais, solo, óleo ou madeira tratada contaminem lotes destinados à valorização.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Barbosa et al. (2019), Leandro et al. (2019), Morais et al. (2021), Paes, Campos-Silva e Oliveira (2021) e na síntese das seções 3.3 a 3.5.

3.6 Caracterização física

A caracterização física responde a perguntas operacionais: o material pode ser coletado, armazenado, dosado e aquecido com estabilidade? O teor de umidade é o primeiro parâmetro. Ele afeta a massa transportada, a deterioração, o poder calorífico útil e a energia necessária para a secagem. A umidade deve ser informada com base claramente definida — úmida ou seca — e medida em diferentes lotes, porque um único valor obtido após a secagem laboratorial não descreve a condição recebida pela unidade.

A densidade aparente relaciona a massa e o volume ocupado, incluindo os vazios existentes entre as partículas; a densidade real descreve o sólido. A primeira orienta o dimensionamento de silos, veículos e sistemas de alimentação do reator. Materiais leves e fibrosos podem exigir grandes volumes de transporte, enquanto caroços densos apresentam outro comportamento. Trituração e densificação podem melhorar o manuseio, mas consomem energia e criam poeira, desgaste e risco de incêndio.

Granulometria e forma influenciam o escoamento, a mistura, a transferência de calor e o tempo de residência. Uma distribuição granulométrica muito ampla favorece a segregação: partículas finas se acumulam ou são arrastadas, enquanto peças grandes aquecem lentamente. O relatório deve apresentar a distribuição de tamanhos e o método de peneiramento, e não apenas um diâmetro médio. Impurezas visíveis precisam ser quantificadas por categoria e massa.

Capacidade de absorver água, higroscopicidade, ângulo de repouso e resistência à fragmentação podem ser relevantes para materiais armazenados. Em clima úmido, a biomassa seca pode reabsorver água e perder estabilidade. Os ensaios devem reproduzir a condição logística, incluindo exposição, compactação e tempo de armazenamento. A caracterização física não é um apêndice do processo: ela define se o fluxo chega ao equipamento com a regularidade necessária.

3.7 Caracterização química e térmica

A biomassa é formada por fases orgânicas e minerais cuja proporção varia amplamente. Vassilev et al. (2010) demonstram que umidade, cinzas e elementos inorgânicos apresentam grande diversidade entre as biomassas. Por isso, o nome da espécie ou do resíduo não é suficiente para predizer seu comportamento. Solo aderido, adubação, ambiente de crescimento, parte da planta e processamento anterior podem modificar materiais de uma mesma origem biológica.

A análise imediata determina, em termos operacionais, umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. A análise elementar quantifica principalmente carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, podendo incluir oxigênio por diferença e halogênios quando houver risco. Esses

resultados apoiam balanços, avaliação energética e previsão de emissões, mas precisam informar o método utilizado, a base de cálculo e a incerteza analítica.

A composição estrutural — celulose, hemicelulose, lignina e extrativos — ajuda a compreender a resistência, a degradação e a conversão térmica. A lignina tende a favorecer maior formação de sólido carbonoso, enquanto celulose e hemicelulose apresentam perfis distintos de decomposição. Os extrativos podem influenciar odor, ignição, adesão e formação de produtos condensáveis. Essas relações não são regras isoladas, porque temperatura, taxa de aquecimento, atmosfera e geometria do reator interagem com a matéria-prima.

O teor e a composição das cinzas merecem atenção especial. Potássio, cálcio, magnésio e fósforo podem ser agronomicamente úteis, mas concentrações elevadas de sais alteram o pH e a condutividade elétrica. Sílica, cloro e outros elementos podem causar incrustação, corrosão ou limitar determinadas aplicações. Metais potencialmente tóxicos não desaparecem durante a pirólise e podem se concentrar no produto sólido. A análise deve ser definida pelo risco e pelo uso final, e não apenas pelo custo do pacote laboratorial.

O poder calorífico e a análise termogravimétrica ajudam a avaliar o comportamento energético e as faixas de decomposição. O poder calorífico superior medido em material seco não representa a energia líquida de um resíduo úmido; o balanço deve descontar a energia empregada na secagem, as perdas e o consumo dos equipamentos auxiliares. Ensaios termogravimétricos com pequenas amostras são úteis para comparação, mas não substituem testes de alimentação, transferência de calor e emissões em escala piloto.

Estudos com múltiplas matérias-primas confirmam que o produto carbonizado herda características do material e do processo. Ronsse et al. (2013) observaram efeitos da matéria-prima e das condições de pirólise sobre carbono fixo, pH, área superficial e degradabilidade. Enders et al. (2012), ao compararem 94 biocarvões, encontraram ampla variação nos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo e ressaltaram que a utilidade agronômica depende da restrição local do solo. Logo, a caracterização do resíduo e a definição do uso do produto precisam ocorrer de forma articulada.

3.8 Contaminantes, biossegurança e rastreabilidade

A origem determina o plano de perigos. Resíduos vegetais recém-separados podem carregar solo, microrganismos, resíduos de defensivos ou produtos de limpeza. Materiais úmidos armazenados podem desenvolver fungos, produzir aerossóis e gerar calor. Resíduos urbanos podem conter vidro, pilhas, medicamentos, plásticos e matéria fecal. A serragem pode estar

contaminada por lubrificantes, metais ou preservantes. A aparência orgânica não é evidência de segurança.

A avaliação deve considerar perigos biológicos, químicos e físicos. Para cada um, registram-se fonte, probabilidade, severidade, método de detecção e medida de controle. A etapa térmica pode reduzir organismos viáveis, mas não elimina elementos químicos. Alguns compostos podem ser formados durante o processo, enquanto metais permanecem nas cinzas ou no carvão. Consequentemente, o tratamento não corrige uma matéria-prima cuja composição seja desconhecida.

Misturar lotes para diluir a contaminação é tecnicamente e eticamente inadequado. A diluição reduz a concentração medida sem remover a massa do contaminante e distribui o risco por um volume maior de produto. Lotes suspeitos devem ser segregados, identificados e submetidos à análise ou destinação compatível. A perda de rastreabilidade deve ser tratada como uma não conformidade, e não preenchida por estimativas otimistas.

A ficha de lote deve ligar fornecedor, local, data, processo gerador, massa, resultados analíticos, armazenamento, transporte e produto obtido. Mudanças de espécie, fornecedor, insumo agrícola, adesivo, método de lavagem ou tempo de estoque podem exigir nova caracterização. A rastreabilidade protege o usuário, permite o recolhimento do produto e transforma a aprendizagem operacional em controle de qualidade.

A segurança ocupacional inclui exposição à poeira respirável, esforço no manuseio, ruído, partes móveis, incêndio, fumaça, gases e contato biológico. Ventilação, enclausuramento, limpeza, detecção, equipamentos de proteção, treinamento e plano de emergência devem ser compatíveis com a escala. Soluções comunitárias ou descentralizadas não podem receber um padrão inferior de proteção apenas por serem pequenas (Figura 16).

Figura 16 – Caracterização integrada de biomassas residuais e produtos carbonizados. *Amostras representativas e rastreáveis são submetidas a ensaios de umidade, densidade aparente, distribuição granulométrica, análise imediata, composição química, comportamento térmico e avaliação de contaminantes. A combinação dos resultados físicos, químicos, térmicos e de biossegurança orienta o armazenamento, o processamento e a adequação do produto ao uso pretendido.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Vassilev et al. (2010), Enders et al. (2012), Ronsse et al. (2013), Barbosa et al. (2019) e nos critérios de caracterização e rastreabilidade deste capítulo.

3.9 Impactos do descarte e do manejo inadequado

O acúmulo de resíduos orgânicos úmidos favorece fermentação, odores, atração de vetores e formação de líquidos com elevada carga orgânica. Quando o material é lançado em canais, várzeas ou margens, pode obstruir a drenagem, consumir oxigênio durante a decomposição e transportar contaminantes. A magnitude dos impactos depende da composição, volume, clima, hidrologia e proximidade de pessoas e ecossistemas. Por isso, o diagnóstico deve combinar observação local e medição.

Em ambientes de disposição com condições anaeróbias, a degradação da matéria orgânica produz metano. As diretrizes do IPCC modelam essas emissões em função da quantidade, composição, carbono degradável e condição do local de disposição (IPCC, 2019). Desviar a matéria orgânica pode reduzir emissões futuras, mas o benefício líquido depende das emissões do transporte, tratamento, energia auxiliar e destino do carbono e dos coprodutos.

A queima aberta reduz o volume, porém libera fumaça e partículas sem recuperação controlada de energia. Pilhas secas de serragem, fibras e caroços também apresentam risco de propagação do fogo. Materiais finos podem formar atmosferas explosivas em espaços fechados. Proibir a queima sem oferecer coleta, armazenamento e alternativas viáveis tende apenas a deslocar o problema. A gestão precisa combinar normas, infraestrutura e assistência técnica.

Resíduos madeireiros abandonados em pátios ocupam área, acumulam umidade e podem ser contaminados até perderem suas opções de uso. Em contrapartida, a remoção excessiva de restos vegetais na floresta empobrece o sistema e aumenta a perturbação. O mesmo material pode

representar um passivo no pátio e desempenhar função ecológica no local de colheita. A avaliação de impacto exige distinguir esses contextos.

A linha de base deve registrar o destino atual e seus efeitos. Se um caroço já substitui lenha de origem insustentável, convertê-lo em biocarvão pode deslocar a demanda para outra fonte. Se uma casca retorna ao solo de modo adequado, sua retirada exporta nutrientes. Se um resíduo é descartado em área urbana e causa obstrução, a prioridade imediata pode ser organizar sua coleta e armazenamento. Os benefícios somente podem ser atribuídos ao projeto quando comparados com esse cenário realista.

3.10 Armazenamento, logística e escala

Biomassas residuais costumam reunir baixo valor por massa, umidade variável e geração dispersa. O transporte pode dominar os custos e as emissões, principalmente quando rios e estradas mudam de condição ao longo do ano. A distância linear não é suficiente: o inventário deve registrar rota, tempo, transbordos, capacidade do veículo, viagem de retorno, perdas e janela de navegação. Processar próximo da origem pode ser vantajoso, mas exige controle de qualidade distribuído.

O armazenamento deve preservar a especificação e impedir riscos. Piso drenado, cobertura, ventilação, separação de lotes, afastamento de fontes de ignição, controle de acesso e rotação por ordem de chegada são medidas básicas. Temperatura, umidade, odor, presença de vetores e sinais de autocombustão precisam ter uma frequência de inspeção definida. A capacidade deve ser dimensionada pelo pico de entrada e pelo maior intervalo provável sem processamento ou transporte.

Secagem solar coberta, uso de calor recuperado e drenagem mecânica podem reduzir a umidade, mas cada solução precisa de balanço energético e controle. Secar material já degradado não restaura sua qualidade. A etapa deve ocorrer cedo, quando apropriada, e sem lançar vapores, líquidos ou partículas sobre trabalhadores e vizinhança. O teor-alvo de umidade depende do equipamento e da estabilidade de armazenamento, e não de um valor universal.

A escala ótima resulta da relação entre oferta, qualidade, mercado, logística e capacidade de operação. Uma grande unidade central pode controlar melhor as emissões e análises, mas aumenta o transporte e a dependência de fornecimento. Unidades menores reduzem deslocamentos e podem distribuir renda, porém exigem protocolos replicáveis, manutenção e supervisão. Cenários híbridos — pré-processamento local e conversão em polos regionais — devem ser comparados.

3.11 Seleção de rotas de aproveitamento

A seleção começa pela prevenção. Melhorar o rendimento, reduzir perdas na colheita, prolongar a vida útil e ajustar compras pode eliminar o fluxo antes de qualquer tecnologia. Quando ele permanece, a prioridade deve ser conservar o maior valor compatível com a segurança: uso alimentar, extração de compostos, alimentação animal validada, reuso, materiais, retorno de nutrientes, recuperação energética ou conversão em produtos carbonosos. Essa sequência é uma orientação, e não uma fórmula que dispense avaliação.

Rotas biológicas são favorecidas por materiais úmidos e biodegradáveis, desde que contaminantes e condições locais sejam controlados. Rotas materiais dependem de uniformidade, propriedades mecânicas e mercado. Rotas térmicas tendem a exigir frações mais secas e oferecem diferentes balanços entre sólido, líquido, gás e energia. O rejeito permanece necessário para frações sem alternativa segura. A meta é organizar um portfólio de soluções, e não obrigar todo fluxo a uma única tecnologia.

Quadro 3 – Triagem inicial de fluxos residuais e rotas a comparar

Fluxo	Triagem decisiva	Rotas que devem ser comparadas
Caroços, cascas e fibras de frutos	Umidade, sazonalidade, usos alimentares ou agrícolas, lignina, cinzas e contaminação	Extração de compostos, produção de ingredientes ou materiais, compostagem, digestão anaeróbia, aproveitamento energético e conversão termoquímica
Cascas lenhosas e ouriços	Dureza, granulometria, densidade, teor mineral e custos de trituração e secagem	Produção de materiais, combustível sólido, carvão ativado, biocarvão e outros produtos carbonosos
Serragem, cavacos e aparas	Origem legal, espécie ou mistura, umidade, solo aderido, metais, tintas e preservantes	Reúso industrial, produção de painéis, aproveitamento energético e conversão termoquímica
Resíduos orgânicos urbanos segregados	Pureza da separação, putrescibilidade, patógenos, sal, vidro, metais e plásticos	Prevenção, redistribuição de alimentos, compostagem e digestão anaeróbia
Poda urbana e madeira limpa segregada	Espécie, presença de folhas e solo, umidade, contaminantes, logística e regularidade	Cobertura vegetal, compostagem, produção de materiais, aproveitamento energético e conversão termoquímica
Misturas urbanas e madeira tratada	Composição desconhecida, plásticos, metais, halogênios, preservantes e perda de rastreabilidade	Separação e tratamento especializado; não encaminhar diretamente à produção de biocarvão para uso no solo

Fonte: Elaboração própria, com base na hierarquia da Política Nacional de Resíduos Sólidos e na literatura discutida neste capítulo.

A comparação deve utilizar a mesma unidade funcional e a mesma fronteira. Para um fluxo urbano, a função pode ser manejar uma tonelada na condição recebida; para um projeto agrícola, pode ser fornecer determinado serviço ao solo em uma área e período definidos. Investimento, custo operacional, emissões, água, nutrientes, toxicidade, emprego, distribuição de renda e robustez logística precisa ser avaliados em conjunto. Uma rota tecnicamente possível pode ser territorialmente inadequada.

Usos concorrentes devem ser tratados como parte do cenário, e não como obstáculos a serem ignorados. Preço, contratos, sazonalidade e valor social revelam se o material já é utilizado como recurso. Quando várias rotas são complementares, uma biorrefinaria em cascata pode separar compostos de maior valor e encaminhar a fração remanescente para materiais, energia ou biocarvão. Cada etapa, porém, adiciona equipamentos, controle e dependência de mercado.

3.12 Critérios de elegibilidade para produção de biocarvão

Um fluxo pode ser considerado candidato à produção de biocarvão quando sua origem é conhecida e legítima; a fração é predominantemente orgânica e separada; os contaminantes estão abaixo de limites compatíveis com o uso; a oferta é mensurável; a umidade pode ser manejada com balanço favorável; não existe uso de maior valor claramente preferível; o processo dispõe de controle de emissões; e há uma finalidade comprovada para o produto. A ausência de qualquer um desses elementos não encerra a análise, mas exige correção antes do investimento.

Materiais misturados de resíduos urbanos, lodos sem caracterização, madeira tratada, biomassa de origem ilegal, lotes com plásticos ou metais, resíduos infecciosos e fluxos sujeitos à contaminação variável não devem ser aceitos por conveniência operacional. A pirólise pode concentrar elementos não voláteis e gerar produtos que exigem tratamento. O critério de entrada protege o processo e evita transferir um passivo para o solo, a água ou o usuário.

A especificação deve ser orientada pelo uso. Para aplicação agrícola, são relevantes pH, condutividade elétrica, nutrientes, estabilidade, contaminantes e interação com o solo e a cultura. Para adsorção, porosidade e química superficial tornam-se centrais, sem dispensar a segurança. Para uso como combustível, poder calorífico, umidade, cinzas e emissões ganham maior importância. Produzir primeiro e procurar uma finalidade depois inverte a lógica de qualidade.

Estudos amazônicos com açaí e castanha-do-brasil demonstram que existem matérias-primas tecnicamente promissoras (Sato et al., 2019; Sato et al., 2020; Leandro et al., 2019). A principal conclusão para os projetos, entretanto, não é que esses resíduos sejam universalmente adequados. É que composição, processo e aplicação podem ser investigados de maneira

reproduzível. O projeto local deve demonstrar equivalência ou explicar as diferenças em relação aos estudos publicados.

A decisão deve ocorrer por etapas: triagem documental, amostragem, ensaios laboratoriais, teste de conversão, caracterização do produto, ensaio de uso e piloto integrado. Critérios de interrupção evitam que o investimento já realizado force a continuidade diante de resultados desfavoráveis. Realizar a ampliação de escala somente depois de validar fornecimento, operação, emissões, qualidade, aplicação, mercado e responsabilidades reduz os riscos técnicos e sociais.

3.13 Protocolo mínimo para diagnóstico de um fluxo residual

O protocolo a seguir organiza as informações necessárias antes da escolha de equipamentos ou do anúncio do potencial de uma biomassa. Ele pode ser ampliado conforme o risco, a escala e a regulamentação aplicável.

Definir objetivo e fronteira: declarar qual problema será resolvido, qual função será entregue, quais etapas e atores integram a análise e qual cenário de referência será utilizado na comparação.

Descrever o processo gerador: registrar matéria-prima, insumos, equipamentos, produto principal, pontos de geração, separação, efluentes, perdas e destino atual.

Medir quantidade e variabilidade: utilizar pesagens ou métodos calibrados, produzir balanço de massa, registrar frequência e sazonalidade e apresentar incertezas e cenários.

Elaborar o plano de amostragem: definir lote, número e posição dos incrementos, formação da amostra composta, preservação, cadeia de custódia e critérios para realização de nova amostragem.

Caracterizar conforme a decisão: medir as propriedades físicas, químicas, térmicas e sanitárias que diferenciam as rotas, utilizando métodos documentados, base de cálculo definida e controle analítico.

Avaliar riscos e conformidade: identificar origem legal, contaminantes, exposição ocupacional, emissões, uso de água, risco de incêndio, licenças, responsabilidades e condições que tornam o lote inelegível.

Comparar alternativas: aplicar a hierarquia de gestão dos resíduos, mapear usos concorrentes e comparar o desempenho ambiental, social, técnico e econômico utilizando a mesma unidade funcional.

Testar progressivamente: realizar ensaio de bancada, caracterizar os produtos, validar a aplicação e executar um piloto integrado antes de definir escala e contratos de longo prazo.

Figura 17 – Protocolo progressivo de elegibilidade e validação para produção de biocarvão. *O fluxo candidato avança da verificação de origem e segregação para a amostragem, os ensaios laboratoriais, a conversão em escala piloto, o controle de emissões, a caracterização do biocarvão e a validação em casa de vegetação e campo. Lotes contaminados ou sem rastreabilidade permanecem isolados, e a ampliação de escala ocorre somente após a confirmação do fornecimento, da segurança do processo e da adequação do produto ao uso final.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Enders et al. (2012), Ronsse et al. (2013), Sato et al. (2019), Sato et al. (2020) e nos critérios de elegibilidade e diagnóstico das seções 3.12 e 3.13.

Os dados devem formar um dossiê atualizável. Planilhas de entrada, laudos, fotografias, mapas, entrevistas, notas de pesagem e decisões de aceitação precisam ser versionados. Quando uma hipótese for utilizada, ela deve aparecer separada das medições. Essa disciplina permite auditoria, revisão científica e comparação entre territórios sem apagar as diferenças locais.

O diagnóstico também explicita lacunas de pesquisa. Um fluxo pode apresentar volume conhecido e composição desconhecida, ou boa caracterização laboratorial e logística inviável. Priorizar estudos que reduzam a incerteza decisiva é mais eficiente que acumular análises sem conexão com a escolha. A ciência relevante para a implementação é aquela que torna observáveis as condições de sucesso e de fracasso.

3.14 Síntese do capítulo

Os resíduos amazônicos não constituem uma reserva uniforme de matéria-prima. Fluxos agroindustriais, madeireiros e urbanos diferem em origem, função, umidade, densidade, composição, contaminação, sazonalidade e direitos de acesso. A quantidade sustentável disponível somente pode ser estimada depois de descontar usos existentes, funções ecológicas, perdas, riscos e limitações logísticas.

Caracterização e inventário precisam avançar juntos. Medir massa sem conhecer a qualidade superestima a oferta; analisar uma amostra sem compreender sua geração produz uma falsa precisão. Separação na origem, amostragem representativa, rastreabilidade e comparação de rotas são as bases para evitar que a valorização apenas transfira impactos. O biocarvão é uma possibilidade para frações limpas, rastreáveis e adequadas, e não um destino automático para qualquer material orgânico.

O próximo capítulo diferenciará biocarvão, carvão vegetal, carvão ativado, hidrocarvão, cinzas e outros materiais carbonosos. Essa distinção é necessária porque intenção de uso, processo, propriedades e critérios de segurança definem produtos diferentes, mesmo quando partem de biomassas semelhantes.

Referências

BARBOSA, A. M.; REBELO, V. S. M.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 24, n. 3, art. e12435, 2019. https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0750

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.** Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/04/Plano_Nacional_de_Residuos_Solidos.pdf. Acesso em: 28 ago. 2026.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais 2023: Suplemento de Saneamento.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/19879-suplementos-munic2.html. Acesso em: 28 ago. 2026.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste.** Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html. Acesso em: 28 ago. 2026.

LEANDRO, R. I. M.; ABREU, J. J. C.; MARTINS, C. S.; SANTOS, I. S.; BIANCHI, M. L.; NOBRE, J. R. C. Elementary, chemical and energy characteristics of Brazil nuts waste (*Bertholletia excelsa*) in the State of Pará. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. esp. 2, art. e20180436, 2019. https://doi.org/10.1590/2179-8087.043618

MARASCA, N.; BRITO, M. R.; RAMBO, M. C. D.; PEDRAZZI, C.; SCAPIN, E.; RAMBO, M. K. D. Analysis of the potential of cupuaçu husks (*Theobroma grandiflorum*) as raw material for the synthesis of bioproducts and energy generation. **Food Science and Technology**, v. 42, art. e48421, 2022. https://doi.org/10.1590/fst.48421

MORAIS, W. W. C.; BRITO, J. O.; LANA, A. Q.; DIAS JÚNIOR, A. F.; MORAIS, J. B. F. Investigating waste generated from logging in the Amazon for energy use. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, art. e3712, 2021. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.15

NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; JOHN, V. M. Logging residues and CO_2 of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016

OLIVEIRA, B. O. S.; MEDEIROS, G. A.; PAES, M. X.; MANCINI, S. D. Integrated municipal and solid waste management in the Amazon: addressing barriers and challenges in using the Delphi method. **International Journal of Environmental Impacts**, v. 4, n. 1, p. 49-61, 2021. https://doi.org/10.2495/EI-V4-N1-49-61

PAES, M. X.; CAMPOS-SILVA, J. V.; OLIVEIRA, J. A. P. Integrating circular economy in urban Amazon. **npj Urban Sustainability**, v. 1, art. 29, 2021. https://doi.org/10.1038/s42949-021-00031-z

RONSSE, F.; VAN HECKE, S.; DICKINSON, D.; PRINS, W. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB* **Bioenergy,** v. 5, n. 2, p. 104-115, 2013. https://doi.org/10.1111/gcbb.12018

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar from Acai agroindustry waste: study of pyrolysis conditions. **Waste Management**, v. 96, p. 158-167, 2019. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.022

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açaí waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36-46, 2020. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022



PARTE II

BIOCARVÃO: PRODUÇÃO, QUALIDADE E APLICAÇÕES

CAPÍTULO 4

BIOCARVÃO E OUTROS MATERIAIS CARBONOSOS: CONCEITOS, PROPRIEDADES E CRITÉRIOS DE DIFERENCIAÇÃO

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Anne Cristina Barbosa Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Ana Clara Ribeiro Gonçalves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Thaysa Helena Alves Farias
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Paola France Santos de Castro
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Carlos Antônio Marinho Mendonça Oliveira
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

João Victor Costa Rezende
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1290

Este capítulo diferencia o biocarvão de outros materiais carbonosos que podem apresentar origem, composição ou aparência semelhante. A classificação correta depende da matéria-prima, do processo de produção, das propriedades, da finalidade de uso e dos critérios de segurança. O objetivo não é estabelecer uma hierarquia universal entre os produtos, mas esclarecer quando carvão vegetal, carvão ativado, hidrocarvão, cinzas e materiais correlatos podem — ou não — ser classificados como biocarvão.

4.1 Os materiais carbonosos como uma família heterogênea

A expressão "material carbonoso" abrange um conjunto amplo de sólidos nos quais o carbono constitui componente importante. Dentro desse conjunto encontram-se materiais naturais, produtos industriais e resíduos formados durante processos de combustão ou conversão termoquímica.

A composição desses materiais pode incluir carbono orgânico em diferentes graus de aromaticidade, matéria volátil, estruturas minerais, grupos funcionais superficiais, nutrientes, metais e contaminantes orgânicos. Por isso, dois materiais visualmente semelhantes podem apresentar comportamentos completamente distintos quando adicionados ao solo, utilizados como combustível ou empregados na remoção de contaminantes.

A formação de um produto carbonoso pode ser representada conceitualmente pela interação entre cinco componentes:

1. Origem e composição da matéria-prima;
2. Processo de conversão;
3. Condições operacionais;
4. Tratamentos posteriores;
5. Finalidade prevista para o produto.

A matéria-prima influencia o teor de cinzas, a estrutura dos poros, a presença de nutrientes e o risco de contaminantes. Biomassas lenhosas, por exemplo, geralmente apresentam composição diferente de lodos, estercos, resíduos de alimentos ou cascas de frutos. O processo determina a intensidade das transformações químicas, enquanto temperatura, tempo de residência, pressão, taxa de aquecimento e presença de agentes oxidantes interferem na estabilidade e na estrutura do carbono formado (RONSSE et al., 2013).

Os tratamentos posteriores também são decisivos. Trituração, peneiramento, lavagem, secagem, ativação física, ativação química, enriquecimento com nutrientes e mistura com outros materiais podem modificar substancialmente o produto. Finalmente, a finalidade de uso orienta os parâmetros que precisam ser avaliados. Um material adequado como combustível não será

necessariamente seguro para aplicação agrícola; da mesma forma, um biocarvão agronomicamente promissor não apresentará obrigatoriamente capacidade de adsorção comparável à de um carvão ativado.

Assim, a classificação não deve ser baseada em uma única propriedade. Teor elevado de carbono, coloração escura ou presença de poros não bastam para determinar a identidade e a qualidade de um produto (Figura 18).

Figura 18 – Formação da identidade de um material carbonoso. *A identidade e a adequação de um material carbonoso resultam da interação entre origem e composição da matéria-prima, rota de conversão, condições operacionais, tratamentos posteriores e finalidade prevista. Produtos de aparência semelhante podem apresentar propriedades e requisitos de segurança distintos.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Ronsse et al. (2013), Camps-Arbestain et al. (2015), Lehmann e Joseph (2015).

4.2 O que é biocarvão?

O biocarvão é um material sólido rico em carbono, obtido pela conversão termoquímica de biomassa sob disponibilidade limitada de oxigênio, produzido com a intenção de ser utilizado no solo ou em outras aplicações ambientais e produtivas compatíveis com suas propriedades.

Essa definição contém elementos importantes. O primeiro é a origem da matéria-prima. O biocarvão deve ser produzido a partir de materiais biogênicos adequados, cuja procedência possa ser identificada. A utilização de resíduos contaminados ou misturas de origem desconhecida pode comprometer sua segurança.

O segundo elemento é a transformação termoquímica. Durante o aquecimento, a biomassa perde água e libera uma parcela de seus componentes na forma de gases e vapores condensáveis. O sólido remanescente torna-se progressivamente enriquecido em carbono e apresenta alterações

em sua estrutura química. A intensidade dessas transformações depende das condições de produção.

O terceiro elemento é a disponibilidade limitada de oxigênio. A presença excessiva de oxigênio favorece a combustão e a conversão do carbono em dióxido de carbono, reduzindo a formação do produto sólido. No entanto, "ausência de oxigênio" não deve ser interpretada de maneira absoluta: processos industriais e artesanais apresentam diferentes níveis de vedação, circulação de gases e controle da atmosfera.

O quarto elemento é a finalidade. A literatura científica e os sistemas de certificação distinguem o biocarvão de outros carvões pela intenção de utilização no solo, em aplicações ambientais ou em materiais duráveis. Esse destino exige controle de qualidade mais amplo do que aquele normalmente aplicado a um combustível sólido (IBI, 2014; EBC, 2024).

Essa definição não significa que todo biocarvão seja automaticamente benéfico. Seu desempenho dependerá da interação entre propriedades do produto, características do solo, cultura agrícola, clima, dose, forma de aplicação e manejo. Alguns produtos podem elevar o pH de solos ácidos, fornecer determinados nutrientes, modificar a retenção de água ou reduzir a mobilidade de contaminantes. Outros podem apresentar efeitos pequenos, nulos ou até indesejáveis.

Por essa razão, o termo biocarvão identifica uma categoria de materiais, e não um produto com propriedades universais. Cada lote necessita de caracterização compatível com o uso proposto.

4.3 Biocarvão e carvão vegetal

O carvão vegetal é tradicionalmente produzido pela carbonização de madeira ou de outras biomassas e utilizado principalmente como combustível ou agente redutor. Sua qualidade costuma ser avaliada por propriedades relacionadas ao desempenho energético e industrial, como poder calorífico, teor de carbono fixo, umidade, resistência mecânica, densidade aparente, teor de materiais voláteis e quantidade de cinzas (Antal; Grønli, 2003).

O biocarvão e o carvão vegetal podem ser produzidos por rotas termoquímicas semelhantes. Em alguns casos, inclusive, podem apresentar composição e aparência próximas. A principal diferença está na finalidade, nos critérios de seleção da matéria-prima, nos requisitos de segurança e na caracterização exigida.

Quando um carvão é produzido para ser queimado, o objetivo principal é liberar energia ou atuar em um processo metalúrgico. Quando é produzido para permanecer no solo ou participar de processos ambientais, tornam-se prioritários outros parâmetros, como:

- Estabilidade do carbono;
- pH e condutividade elétrica;

- Disponibilidade de nutrientes;
- Distribuição do tamanho das partículas;
- Presença de metais potencialmente tóxicos;
- Concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos;
- Capacidade de retenção de água;
- Composição da matéria volátil;
- Interação com o solo e com os organismos;
- Rastreabilidade da matéria-prima.

A mudança de destino não pode ocorrer apenas pela alteração do nome comercial. Um carvão vegetal produzido sem controle de matéria-prima, emissões e contaminantes não deve ser aplicado diretamente ao solo sob a denominação de biocarvão. Para essa utilização, seria necessário demonstrar que o material atende aos critérios de qualidade e segurança correspondentes.

Essa distinção também é relevante para os balanços de carbono. O carvão utilizado como combustível devolve rapidamente parte de seu carbono à atmosfera durante a combustão. Já o biocarvão destinado a aplicações nas quais o carbono permaneça armazenado pode apresentar contribuição para estratégias de remoção ou retenção de carbono. Entretanto, essa contribuição precisa considerar toda a cadeia produtiva, incluindo coleta, transporte, secagem, consumo energético, emissões do processo e destino dos coprodutos.

4.4 Biocarvão e carvão ativado

O carvão ativado é um material carbonoso preparado para apresentar estrutura porosa e química superficial adequadas à adsorção. Sua fabricação geralmente envolve uma etapa de carbonização seguida de ativação física ou química. A ativação física pode utilizar vapor de água ou dióxido de carbono em temperaturas elevadas. A ativação química emprega reagentes que promovem o desenvolvimento da porosidade e alteram a superfície do material.

Resíduos agrícolas e agroindustriais podem ser utilizados como precursores de carvão ativado. Cascas, caroços, fibras e resíduos lenhosos apresentam potencial, mas o desempenho depende da matéria-prima, do agente ativante, das condições de processamento, da lavagem e da recuperação ou destinação dos reagentes (Yahya; Al-Qodah; Ngah, 2015).

A diferença central entre biocarvão e carvão ativado está no grau de engenharia do material e na finalidade predominante. O carvão ativado é produzido para aplicações de adsorção, purificação, separação ou catálise. Para isso, deve apresentar desempenho mensurável diante de substâncias específicas. O biocarvão, por sua vez, pode apresentar capacidade de adsorção, mas

geralmente é produzido com objetivos agrícolas, ambientais ou de armazenamento de carbono mais amplos.

Uma elevada área superficial não transforma automaticamente um biocarvão em carvão ativado. O conceito de ativação implica um tratamento planejado para desenvolver a porosidade ou modificar a química superficial. Além disso, a área superficial total não é o único fator que controla a adsorção. Distribuição dos poros, carga da superfície, grupos funcionais, pH da solução, concentração do contaminante e competição com outras substâncias influenciam o desempenho.

Também não se deve concluir que o carvão ativado será sempre superior em qualquer aplicação. Sua fabricação pode exigir temperaturas mais elevadas, reagentes químicos, etapas de lavagem e maior consumo de energia. Para alguns usos de menor exigência, um biocarvão cuidadosamente selecionado pode apresentar desempenho suficiente e custo inferior. Para aplicações críticas, como tratamento de água para consumo humano, são indispensáveis ensaios específicos, controle sanitário e atendimento às normas aplicáveis.

4.5 Hidrocarvão

O hidrocarvão, conhecido internacionalmente como *hydrochar*, é o produto sólido da carbonização hidrotérmica. Diferentemente da pirólise convencional, esse processo ocorre na presença de água líquida aquecida e pressurizada.

A carbonização hidrotérmica pode ser especialmente interessante para biomassas com elevada umidade, pois reduz a necessidade de secagem completa antes da conversão. Durante o processo ocorrem reações como hidrólise, desidratação, descarboxilação, condensação e polimerização. Parte da matéria orgânica permanece no sólido, enquanto outra parcela é transferida para a fase líquida ou convertida em gases (Funke; Ziegler, 2010; Libra et al., 2011).

Embora o hidrocarvão e o biocarvão sejam produtos ricos em carbono, eles não devem ser tratados como equivalentes. O meio reacional e os mecanismos de formação são diferentes. Em muitos casos, o hidrocarvão apresenta maior proporção de hidrogênio e oxigênio, maior quantidade de grupos funcionais superficiais e estabilidade distinta da observada em materiais produzidos por pirólise mais intensa (Kambo; Dutta, 2015).

A fase líquida gerada na carbonização hidrotérmica pode conter ácidos orgânicos, compostos fenólicos, açúcares degradados, nutrientes e substâncias potencialmente tóxicas. Seu tratamento constitui parte essencial da avaliação ambiental do processo. Portanto, a conversão de resíduos úmidos em hidrocarvão não elimina automaticamente o problema ambiental; ela redistribui componentes entre as fases sólida, líquida e gasosa.

A utilização de hidrocarvão no solo exige caracterização própria. Devem ser avaliados estabilidade, fitotoxicidade, contaminantes, pH, salinidade e possíveis compostos orgânicos solúveis. O produto não deve ser classificado como biocarvão apenas porque apresenta coloração escura ou origem renovável.

4.6 Biomassa torrificada

A torrefação é um tratamento termoquímico relativamente brando, geralmente realizado em temperaturas inferiores às empregadas na produção de carvões mais intensamente carbonizados. O processo promove a remoção de água e de parte dos compostos voláteis, aumenta a densidade energética e pode melhorar a moagem, o armazenamento e a resistência da biomassa à absorção de umidade.

A biomassa torrificada é empregada principalmente como combustível sólido ou como material intermediário em cadeias de conversão energética. Sua estrutura química ainda preserva uma proporção considerável dos componentes originais da biomassa. Por isso, tende a apresentar menor grau de carbonização e estabilidade do que muitos biocarvões produzidos em temperaturas mais elevadas (Van Der Stelt et al., 2011).

Não existe, entretanto, uma fronteira universal determinada apenas pela temperatura. As características do produto formam um contínuo, e o tempo de residência, a taxa de aquecimento, o tamanho das partículas e a composição da matéria-prima modificam o resultado. A classificação precisa considerar o conjunto de propriedades e a finalidade do produto.

Assim, a biomassa torrificada não deve ser apresentada como biocarvão sem que sejam demonstrados sua estabilidade, segurança e atendimento aos critérios da aplicação pretendida.

4.7 Carvão de gaseificação, fuligem e carbono negro

A gaseificação converte materiais carbonosos em uma mistura gasosa combustível ou utilizável como insumo químico. Embora o objetivo principal seja a produção de gás, o processo pode gerar uma fração sólida residual conhecida como carvão de gaseificação ou *gasification char*.

Esse resíduo pode conter carbono, cinzas, metais e compostos orgânicos formados durante o processo. Dependendo da matéria-prima, da configuração do equipamento e das condições operacionais, suas propriedades podem variar significativamente. Alguns carvões de gaseificação podem atender aos requisitos para utilização como biocarvão, mas essa possibilidade precisa ser demonstrada por caracterização e controle de qualidade. O simples fato de constituírem resíduos carbonosos de biomassa não garante sua segurança.

A fuligem, por sua vez, é formada por partículas finas provenientes da combustão incompleta. Sua geração geralmente indica deficiência na combustão ou no controle de emissões. Por apresentar partículas respiráveis e poder transportar compostos orgânicos tóxicos, a fuligem deve ser tratada como poluente, e não como insumo agrícola.

A expressão "carbono negro" também exige cautela. Em diferentes áreas científicas, ela pode designar uma família de materiais carbonizados resultantes de incêndios, combustão, processos geológicos ou atividades humanas. O termo é útil em estudos ambientais e climáticos, mas não corresponde automaticamente ao conceito de biocarvão.

Na literatura recente, a expressão "carbono pirogênico" é frequentemente utilizada para abranger materiais carbonosos formados pela transformação térmica incompleta de biomassa e de outros compostos orgânicos. O biocarvão pertence a essa família, mas representa uma fração produzida intencionalmente e submetida a critérios definidos de origem, produção, qualidade e uso.

4.8 Cinzas de biomassa

As cinzas, são resíduos predominantemente minerais formados durante a combustão ou a oxidação intensa da biomassa. Elas contêm elementos que não foram volatilizados ou incorporados aos gases do processo, podendo incluir cálcio, potássio, magnésio, fósforo, silício, alumínio, ferro e outros componentes.

A composição das cinzas varia de acordo com a espécie vegetal, parte da planta, solo de origem, contaminação da matéria-prima, temperatura de combustão e eficiência do equipamento. Cinzas de madeira limpa podem apresentar características muito diferentes daquelas provenientes de resíduos urbanos, painéis reconstituídos, madeira tratada ou biomassas contaminadas (Vassilev et al., 2013a).

Como algumas cinzas apresentam reação alcalina e contêm nutrientes, elas podem ser utilizadas como corretivos ou fertilizantes em determinadas condições. Contudo, também podem apresentar salinidade elevada, concentração de metais, reatividade excessiva ou desequilíbrio entre nutrientes. A aplicação sem análise pode elevar demasiadamente o pH, provocar toxicidade ou introduzir contaminantes no solo.

A cinza não é biocarvão. Enquanto o biocarvão conserva uma fração expressiva de carbono orgânico, a cinza corresponde majoritariamente à fração inorgânica remanescente. Materiais provenientes de processos incompletos podem conter simultaneamente carbono residual e cinzas, mas essa mistura precisa ser caracterizada antes de receber qualquer classificação.

Na Amazônia, a utilização tradicional de cinzas em áreas agrícolas não deve ser confundida com a aplicação de biocarvão. Ambos podem alterar a acidez e a disponibilidade de nutrientes, porém apresentam mecanismos, persistência e riscos diferentes.

4.9 Terras Pretas Amazônicas e biocarvão moderno

As Terras Pretas de Índio, também denominadas Terras Pretas Amazônicas, são solos antrópicos encontrados em diferentes partes da Amazônia. Elas apresentam, em geral, coloração escura, elevada concentração de carbono pirogênico e maior fertilidade quando comparadas a muitos solos adjacentes. Também podem conter fragmentos cerâmicos, restos de alimentos, ossos, cinzas e outros vestígios de ocupação humana.

Esses solos foram formados ao longo de períodos prolongados de manejo e ocupação por povos indígenas. Sua fertilidade não decorre de um único material, mas da interação entre adições sucessivas de resíduos orgânicos, materiais queimados, nutrientes, atividade biológica e processos de transformação ocorridos no solo (Glaser et al., 2001; Glaser; Lehmann; Zech, 2002).

Evidências arqueológicas, etnográficas, geoquímicas e experimentais reforçam que a formação de solos escuros ricos em carbono esteve associada a práticas humanas intencionais ou sistemáticas, ainda que os mecanismos e objetivos possam ter variado entre lugares e períodos (Schmidt et al., 2023).

A importância dessas evidências para a ciência contemporânea é inegável. As Terras Pretas contribuíram para o reconhecimento de que formas de carbono pirogênico podem persistir no solo e interagir com nutrientes, minerais e organismos. No entanto, equiparar o biocarvão moderno às Terras Pretas constitui uma simplificação indevida.

O biocarvão é um material produzido em determinado momento e sob condições específicas. A Terra Preta é um sistema de solo complexo, histórico e culturalmente construído. Adicionar biocarvão a um solo não reproduz automaticamente sua fertilidade, biodiversidade ou estabilidade.

Essa distinção possui também uma dimensão ética. Os conhecimentos e as práticas indígenas que participaram da construção das paisagens amazônicas não devem ser reduzidos a uma técnica industrial isolada. A inovação contemporânea precisa reconhecer a contribuição histórica desses povos e evitar discursos que apresentem como descoberta recente aquilo que resulta de longos processos de conhecimento, experimentação e manejo territorial (Figura 19).

Figura 19 – Terras Pretas Amazônicas e aplicação moderna de biocarvão: sistemas não equivalentes. *As Terras Pretas Amazônicas apresentam horizontes antrópicos formados ao longo de períodos prolongados pela interação entre manejo humano, carbono pirogênico, resíduos orgânicos, nutrientes, minerais e atividade biológica. A aplicação moderna de biocarvão constitui uma intervenção definida e submetida a ensaios específicos; por si só, ela não reproduz a fertilidade, a biodiversidade, a estabilidade nem a dimensão histórica e cultural desses solos.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Glaser et al. (2001), Glaser, Lehmann e Zech (2002) e Schmidt et al. (2023).

4.10 Comparação entre os principais materiais

O quadro 4 sintetiza as diferenças conceituais entre os principais materiais abordados neste capítulo.

Quadro 4 – Comparação entre biocarvão e materiais relacionados

Material	Rota predominante	Finalidade mais comum	Característica distintiva	Cuidado de classificação
Biocarvão	Conversão termoquímica de biomassa sob limitação de oxigênio	Aplicação agrícola, ambiental ou incorporação em materiais	Carbono pirogênico com propriedades e segurança verificadas para o uso pretendido	Nem todo sólido carbonizado pode ser classificado como biocarvão
Carvão vegetal	Carbonização de biomassa	Combustível ou agente redutor	Qualidade definida principalmente pelo desempenho energético e industrial	Não deve ser aplicado ao solo sem caracterização química e toxicológica
Carvão ativado	Carbonização seguida de ativação física ou química	Adsorção, purificação e separação de substâncias	Porosidade e química superficial desenvolvidas intencionalmente	Área superficial elevada, isoladamente, não define um carvão ativado

Hidrocarvão	Carbonização hidrotérmica em água aquecida e pressurizada	Combustível, adsorvente ou precursor de materiais	Formação em meio aquoso e composição química específica	Não é equivalente ao biocarvão produzido por pirólise
Biomassa torrificada	Tratamento térmico brando sob atmosfera controlada	Combustível sólido ou pré-tratamento energético	Menor grau de carbonização	Não se deve presumir elevada estabilidade quando aplicada ao solo
Carvão de gaseificação	Gaseificação parcial da biomassa	Resíduo ou coproduto da produção de gás	Propriedades dependentes da matéria-prima e do gaseificador	Pode apresentar contaminantes e elevada concentração de cinzas
Cinza de biomassa	Combustão ou oxidação intensa	Fonte mineral, corretivo agrícola ou resíduo	Predominância de matéria inorgânica	Não deve ser classificada como biocarvão
Fuligem	Combustão incompleta	Subproduto indesejado do processo	Partículas finas potencialmente tóxicas	Deve ser controlada como emissão atmosférica, e não utilizada como insumo agrícola

Fonte: Elaboração autoral com base em Antal e Grønli (2003), Funke e Ziegler (2010), Vassilev et al. (2013a; 2013b), Lehmann e Joseph (2015) e Kambo e Dutta (2015)

O quadro mostra que a classificação correta depende da rota de produção, da intenção de uso e das propriedades verificadas. Não existe uma hierarquia universal na qual um material seja sempre superior aos demais. A adequação é determinada pelo problema que se pretende resolver e pelas condições em que o produto será empregado (Figura 20).

Figura 20 – Rotas de produção e diferenciação dos principais materiais carbonosos. *Torrefação, pirólise sob limitação de oxigênio, ativação, carbonização hidrotérmica, gaseificação e combustão apresentam meios reacionais, condições operacionais, coprodutos e finalidades diferentes. Biomassa torrificada, biocarvão, carvão ativado, hidrocarvão, carvão de gaseificação e cinza não são equivalentes; a fuligem capturada no controle de emissões deve ser tratada como poluente e não como insumo agrícola.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Antal e Grønli (2003), Funke e Ziegler (2010), Van der Stelt et al. (2011), Vassilev et al. (2013a; 2013b), Kambo e Dutta (2015) e Yahya, Al-Qodah e Ngah (2015).

4.11 Propriedades físicas do biocarvão

4.11.1 Tamanho das partículas

O tamanho das partículas interfere no transporte, armazenamento, mistura, aplicação e comportamento do biocarvão. Partículas muito finas apresentam maior facilidade de dispersão pelo vento, podem produzir poeira respirável e dificultar a aplicação em campo. Partículas muito grandes podem apresentar distribuição irregular no solo e menor contato com seus componentes.

A moagem aumenta a superfície externa disponível, mas também consome energia e pode ampliar perdas durante o manuseio. A granulometria ideal depende da finalidade. Produtos destinados a substratos, fertilizantes compostos, filtros ou aplicação direta no solo podem exigir faixas granulométricas diferentes.

4.11.2 Densidade aparente

Grande parte dos biocarvões produzidos de resíduos vegetais apresenta baixa densidade aparente. Essa característica pode reduzir o peso das misturas e favorecer determinadas aplicações, mas aumenta os custos de transporte por unidade de massa.

Na Amazônia, onde as distâncias e as limitações logísticas constituem fatores relevantes, a densidade influencia diretamente a viabilidade econômica. Transportar biomassa de baixa densidade até uma instalação centralizada e devolver o biocarvão às áreas produtoras pode consumir parcela significativa dos benefícios econômicos e ambientais.

A densificação ou peletização pode facilitar o transporte e o manuseio. Entretanto, a adição de aglomerantes e a compressão modificam as propriedades do produto e precisam ser consideradas na caracterização.

4.11.3 Porosidade e área superficial

A biomassa vegetal possui estruturas vasculares e celulares que podem ser parcialmente preservadas durante a carbonização. Além desses poros de origem biológica, o processo térmico pode formar novas cavidades pela liberação de compostos voláteis.

De acordo com a classificação da União Internacional de Química Pura e Aplicada, os poros podem ser agrupados em microporos, mesoporos e macroporos. Cada faixa participa de forma diferente dos fenômenos de adsorção, transporte de água e interação com moléculas e organismos (Thommes et al., 2015).

A área superficial é frequentemente apresentada como indicador de qualidade, mas sua interpretação exige cautela. Métodos baseados na adsorção de gases podem fornecer resultados diferentes conforme o gás utilizado, a preparação da amostra e o modelo de cálculo. Além disso, uma área superficial elevada não garante desempenho agronômico ou ambiental superior.

Em aplicações no solo, poros muito pequenos podem contribuir para a adsorção de moléculas, enquanto poros maiores participam do movimento da água, do ar e da ocupação por microrganismos. O desempenho resulta da distribuição dos poros e da química superficial, não de um único número.

4.11.4 Retenção de água

O biocarvão pode alterar a capacidade do solo de armazenar e disponibilizar água. O efeito depende da porosidade do produto, da granulometria, da dose, do tipo de solo e do tempo transcorrido após a aplicação.

Em solos arenosos, certos biocarvões podem aumentar a retenção de água. Em solos argilosos ou já estruturados, os efeitos podem ser menores ou seguir outra direção. Parte da água retida nos poros pode não estar disponível às plantas, especialmente quando está fortemente ligada à superfície.

Assim, a afirmação genérica de que o biocarvão "retém água" precisa ser substituída por avaliações que considerem curvas de retenção, água disponível, infiltração, densidade e resposta das culturas.

4.12 Propriedades químicas

4.12.1 Teor de carbono

O teor de carbono indica a proporção desse elemento no material, mas não determina isoladamente sua estabilidade. Dois biocarvões podem apresentar teores semelhantes e estruturas moleculares diferentes.

O aumento da intensidade térmica geralmente promove perda de hidrogênio e oxigênio e maior condensação das estruturas aromáticas. Entretanto, as respostas variam de acordo com a matéria-prima e o processo. A interpretação deve considerar carbono orgânico, carbono inorgânico, matéria volátil, cinzas e composição elementar.

4.12.2 Relações atômicas

As relações entre hidrogênio e carbono e entre oxigênio e carbono são utilizadas como indicadores do grau de carbonização. Em geral, valores menores estão associados a estruturas mais condensadas e resistentes à decomposição.

A relação hidrogênio/carbono orgânico é incorporada a sistemas de classificação e certificação como indicador da intensidade de carbonização. A relação oxigênio/carbono também tem sido estudada como possível indicador de estabilidade (SPOKAS, 2010).

Essas relações não constituem relógios capazes de determinar exatamente quantos anos o material permanecerá no solo. Elas funcionam como indicadores comparativos e precisam ser interpretadas juntamente com outras propriedades e com as condições ambientais.

4.12.3 pH e capacidade de neutralização

Muitos biocarvões apresentam reação neutra ou alcalina, especialmente aqueles com maior concentração de cinzas e bases. A aplicação pode contribuir para a elevação do pH de solos ácidos, mas o efeito varia entre produtos.

O valor de pH medido em suspensão não é equivalente à capacidade de neutralizar a acidez. Dois materiais com pH semelhante podem apresentar capacidades neutralizantes diferentes. Por isso, quando a correção da acidez constitui objetivo importante, devem ser avaliados poder de neutralização, composição das cinzas e resposta do solo.

Doses excessivas de um produto alcalino podem elevar o pH além da faixa adequada, reduzir a disponibilidade de micronutrientes ou alterar comunidades microbianas. A recomendação deve ser baseada em análise do solo e ensaios de dose.

4.12.4 Condutividade elétrica e sais solúveis

A condutividade elétrica é um indicador da quantidade de sais solúveis. Biocarvões produzidos de estercos, lodos, resíduos alimentares ou determinadas biomassas podem apresentar condutividade elevada.

Em algumas condições, esses sais representam nutrientes. Em outras, podem prejudicar a germinação e o desenvolvimento das plantas. O risco é maior em substratos, mudas e cultivos sensíveis. A lavagem reduz parte dos sais, mas gera um efluente que necessita de tratamento ou reaproveitamento controlado.

4.12.5 Nutrientes

Durante a conversão termoquímica, parte do nitrogênio e de outros elementos voláteis pode ser perdida. Elementos menos voláteis tendem a permanecer e a se concentrar na fração sólida. Por isso, biocarvões produzidos de estercos ou resíduos alimentares frequentemente apresentam mais fósforo, cálcio, magnésio e potássio do que aqueles obtidos de madeira limpa.

A presença de um elemento não significa que ele esteja imediatamente disponível às plantas. Fósforo e micronutrientes podem integrar fases minerais pouco solúveis. A disponibilidade depende do pH, das formas químicas, das interações com o solo e do tempo.

O biocarvão não deve ser classificado automaticamente como fertilizante. Alguns produtos fornecem nutrientes; outros atuam principalmente como condicionadores; e certos produtos apresentam contribuição agronômica limitada quando usados isoladamente.

4.12.6 Grupos funcionais e capacidade de troca de cátions

A superfície do biocarvão pode conter grupos funcionais capazes de interagir com nutrientes, contaminantes e componentes do solo. Produtos obtidos em condições térmicas mais brandas geralmente preservam maior proporção de grupos contendo oxigênio. Processos mais intensos tendem a formar estruturas aromáticas condensadas, embora possam reduzir grupos funcionais superficiais.

Após a aplicação, a oxidação e o envelhecimento modificam a superfície do material. Em determinadas condições, essas transformações aumentam cargas negativas e contribuem para a

retenção de cátions. Portanto, a capacidade de troca de cátions observada imediatamente após a produção pode diferir daquela desenvolvida após meses ou anos no solo.

4.13 Estrutura molecular e estabilidade do carbono

A estabilidade é uma das características mais relevantes do biocarvão. Durante a conversão térmica, a estrutura original da biomassa é progressivamente transformada. Celulose, hemicelulose e lignina dão origem a uma combinação de compostos voláteis, líquidos condensáveis e estruturas carbonosas.

Com o aumento da severidade térmica, ocorre maior organização de estruturas aromáticas e redução relativa de hidrogênio e oxigênio. Keiluweit et al. (2010) demonstraram que o carbono derivado de biomassa passa por um contínuo de transformações moleculares, não havendo uma única estrutura comum a todos os biocarvões.

A persistência no solo depende dessas características, mas também de temperatura, umidade, disponibilidade de oxigênio, atividade microbiana, tamanho das partículas e interação com minerais. Uma fração do produto pode ser decomposta relativamente rápido, enquanto outra permanece por períodos muito mais longos.

A presença de carbono estável cria a possibilidade de utilizar o biocarvão em estratégias climáticas. Entretanto, a permanência do produto não é suficiente para afirmar que um sistema apresenta remoção líquida de carbono. É necessário considerar:

- Origem e renovabilidade da biomassa;
- Mudanças no uso do solo;
- Consumo de combustíveis e eletricidade;
- Transporte da matéria-prima;
- Secagem;
- Emissões de metano e outros gases durante a produção;
- Aproveitamento dos gases e líquidos;
- Rendimento do processo;
- Decomposição do produto;
- Destino final do biocarvão.

A contribuição climática deve ser demonstrada por avaliação do sistema, e não inferida apenas pela cor ou pelo teor de carbono do produto (Figura 21).

Figura 21 – Estrutura multiescalar e propriedades condicionais do biocarvão. *A estrutura do biocarvão combina poros de origem vegetal e cavidades formadas durante a conversão, distribuídas em diferentes escalas. Poros maiores podem participar do movimento da água, do ar e da colonização por organismos, enquanto poros menores e a química superficial influenciam a interação com íons e moléculas. Granulometria, densidade, cinzas, grupos funcionais, condições de produção e interação com o solo determinam o desempenho.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Keiluweit et al. (2010), Spokas (2010), Enders et al. (2012) e Thommes et al. (2015).

4.14 Adsorção e imobilização de contaminantes

Biocarvões têm sido investigados como adsorventes de metais, nutrientes, pesticidas, hidrocarbonetos e outros contaminantes presentes em água e solo. Os mecanismos incluem interação eletrostática, troca iônica, complexação, precipitação, preenchimento de poros e interação com superfícies aromáticas (Ahmad et al., 2014).

A predominância de cada mecanismo depende do contaminante e do produto. Um biocarvão alcalino e rico em minerais pode favorecer a precipitação de determinados metais, enquanto um material com área superficial elevada pode apresentar maior afinidade por alguns compostos orgânicos.

A adsorção observada em laboratório não garante eficácia em campo. Solos, efluentes e águas naturais contêm misturas complexas de íons e matéria orgânica que competem pelos mesmos sítios. Mudanças de pH e condições redox também podem liberar substâncias anteriormente retidas.

Outro aspecto importante é o destino do biocarvão após a adsorção. Um material carregado com contaminantes não deixa de apresentar risco porque o contaminante foi removido da água. A regeneração, estabilização ou destinação final precisa integrar o planejamento da tecnologia.

O emprego em sistemas de abastecimento de água ou remediação exige ensaios específicos, avaliação toxicológica e atendimento à legislação. Resultados experimentais promissores não substituem os requisitos sanitários e ambientais.

4.15 Contaminantes e segurança

O processo termoquímico pode eliminar organismos patogênicos e degradar parte dos compostos presentes na matéria-prima, mas também pode formar ou concentrar substâncias indesejáveis. A qualidade do produto depende do controle de toda a cadeia.

4.15.1 Metais e elementos potencialmente tóxicos

Metais não são destruídos durante a conversão térmica. Como parte da matéria orgânica é perdida, eles podem se concentrar na fração sólida. Esse risco é mais relevante em lodos, resíduos urbanos, madeiras tratadas e matérias-primas expostas a processos industriais.

A concentração total precisa ser analisada, mas a mobilidade e a biodisponibilidade também importam. Um elemento inicialmente imobilizado pode tornar-se disponível se ocorrerem mudanças no pH ou nas condições ambientais.

4.15.2 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos podem ser formados durante a conversão térmica, especialmente quando vapores e alcatrões entram em contato com o sólido e nele se condensam. Sua formação é influenciada por matéria-prima, temperatura, tempo de residência e eficiência de remoção dos vapores.

Hale et al. (2012) demonstraram que as concentrações totais e as frações disponíveis desses contaminantes variam entre biocarvões. Isso reforça a necessidade de métodos padronizados e limites de segurança.

A simples utilização de temperatura elevada não garante ausência desses compostos. Projeto do equipamento, fluxo dos gases, resfriamento e armazenamento interferem na qualidade final.

4.15.3 Dioxinas, furanos e outros compostos orgânicos

Dioxinas e furanos podem estar associados a matérias-primas contaminadas com cloro e a condições inadequadas de combustão ou resfriamento. Embora nem todo processo apresente concentrações relevantes, a avaliação de risco deve considerar a origem dos resíduos e a tecnologia empregada.

Compostos orgânicos voláteis e frações condensáveis também podem permanecer no produto quando a conversão é incompleta. Alguns deles podem prejudicar a germinação ou a atividade biológica. Ensaios de fitotoxicidade ajudam a identificar esses riscos.

4.15.4 Materiais estranhos e contaminação física

Plásticos, vidro, metais, pedras, tintas, adesivos e preservantes de madeira podem acompanhar os resíduos. A triagem antes do processamento é preferível à tentativa de corrigir a contaminação depois da carbonização.

No caso de resíduos madeireiros, é fundamental distinguir madeira não tratada de painéis, compensados e materiais contendo resinas, tintas ou preservantes. A aparência semelhante não significa equivalência química.

4.15.5 Poeira, inflamabilidade e segurança ocupacional

Partículas finas de biocarvão podem ser inaladas, dispersar-se pelo ambiente e formar misturas combustíveis com o ar. O material recém-produzido também pode apresentar risco de autoaquecimento ou reignição quando entra em contato com oxigênio antes do resfriamento completo.

Produção, moagem e armazenamento requerem ventilação, controle de poeira, equipamentos de proteção e procedimentos de prevenção de incêndios. A sustentabilidade do produto inclui a proteção das pessoas envolvidas em sua fabricação e aplicação.

4.16 Padrões de qualidade e certificação

A caracterização do biocarvão tem como objetivo demonstrar que o produto possui identidade conhecida, qualidade consistente e segurança compatível com o uso previsto. Documentos da International Biochar Initiative e do European Biochar Certificate propõem requisitos para matéria-prima, produção, propriedades e contaminantes (IBI, 2014; EBC, 2024).

Entre os parâmetros frequentemente avaliados estão:

- Origem da matéria-prima;
- Umidade;
- Teor de carbono orgânico;
- Relações hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono;
- Materiais voláteis;
- Cinzas;
- pH;

- Condutividade elétrica;
- Nutrientes;
- Tamanho das partículas;
- Metais potencialmente tóxicos;
- Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos;
- Contaminantes físicos;
- Estabilidade e condições de armazenamento.

Os critérios e limites podem variar entre sistemas, classes de produto e versões dos documentos. Por isso, recomenda-se indicar claramente qual protocolo foi utilizado, em vez de afirmar apenas que o material foi "analisado".

A certificação não substitui ensaios de eficácia. Um produto pode atender aos requisitos de segurança e ainda apresentar resposta agronômica pequena em determinado solo. Inversamente, um resultado positivo em experimento de curta duração não comprova segurança para aplicação em grande escala.

Também é necessário distinguir qualidade do produto e sustentabilidade do sistema. Uma amostra pode apresentar boa qualidade físico-química, embora tenha sido produzida com alto consumo energético, emissões não controladas ou matéria-prima proveniente de desmatamento. Avaliar somente o sólido é insuficiente para demonstrar sustentabilidade.

4.17 Critérios para seleção do material adequado

A escolha entre biocarvão, carvão ativado, hidrocarvão, cinza ou outro material deve começar pela definição do problema. Somente depois devem ser selecionados o produto e o processo.

Quando o objetivo é corrigir a acidez, devem ser avaliados pH, capacidade de neutralização, composição das cinzas e dose. Para fornecimento de nutrientes, importam teor total, disponibilidade, salinidade e equilíbrio entre elementos. Em estratégias de armazenamento de carbono, estabilidade, balanço de emissões e permanência assumem maior importância.

Para retenção de água, são relevantes porosidade, granulometria e interação com a textura do solo. Na remediação de contaminantes, precisam ser analisados mecanismos de adsorção, seletividade, competição, estabilidade e destino do material contaminado. Em aplicações energéticas, poder calorífico, umidade, densidade e comportamento na combustão são prioritários.

Essa abordagem evita um equívoco recorrente: produzir primeiro e procurar uma aplicação depois. A estratégia tecnicamente mais consistente é identificar a necessidade, estabelecer os

requisitos do produto e, então, escolher matéria-prima e tecnologia capazes de alcançar esses requisitos.

4.18 Implicações para a Amazônia

A diversidade amazônica impede a adoção de uma formulação única de biocarvão. Resíduos de açaí, castanha, dendê, mandioca, cacau, madeira, pescado e sistemas agroflorestais possuem composições diferentes. Mesmo dentro de uma única cadeia produtiva, origem, época de coleta e processamento alteram a qualidade da matéria-prima.

Os solos também são heterogêneos. Embora muitos apresentem acidez elevada e baixa disponibilidade de determinados nutrientes, existem variações importantes de textura, mineralogia, drenagem e histórico de uso. Portanto, o desempenho observado em uma localidade não deve ser generalizado para toda a região.

A elevada pluviosidade pode favorecer lixiviação, erosão e transporte de partículas finas. O produto e a forma de aplicação precisam considerar essas condições. Mistura com composto orgânico, incorporação ao solo, granulação e aplicação localizada são alternativas que devem ser avaliadas experimentalmente.

A logística constitui outro elemento decisivo. Unidades descentralizadas podem reduzir o transporte de biomassa de baixa densidade, mas exigem controle operacional e monitoramento de emissões. Instalações centralizadas podem apresentar melhor controle tecnológico, porém dependem de fornecimento contínuo e distâncias economicamente viáveis.

Também é necessário assegurar que a demanda por matéria-prima não estimule retirada insustentável de resíduos ou exploração de biomassa nativa. Determinados resíduos exercem funções ecológicas, como proteção do solo, ciclagem de nutrientes e manutenção de habitats. A utilização deve respeitar limites de remoção e prioridades já discutidas no Capítulo 3.

Por fim, projetos amazônicos precisam integrar conhecimento científico, participação comunitária e reconhecimento dos saberes tradicionais. Soluções desenvolvidas sem diálogo territorial podem ser tecnicamente inadequadas ou socialmente excludentes. A economia circular só se concretiza quando os benefícios, riscos e responsabilidades são distribuídos de forma justa.

4.19 Protocolo conceitual para identificar um biocarvão

Antes de denominar um material como biocarvão, recomenda-se responder às seguintes perguntas:

1. A matéria-prima é de origem biogênica conhecida e possui rastreabilidade?
2. Sua retirada é ambientalmente sustentável?

3. A matéria-prima contém substâncias ou materiais incompatíveis com o uso pretendido?
4. Qual processo termoquímico foi empregado?
5. As condições de produção foram registradas e controladas?
6. Qual é a finalidade declarada do produto?
7. Quais propriedades são necessárias para essa finalidade?
8. O produto foi analisado por métodos reconhecidos?
9. Contaminantes orgânicos e inorgânicos foram avaliados?
10. Existem ensaios agronômicos, ambientais ou tecnológicos compatíveis com o uso?
11. O processo controla emissões, efluentes e riscos ocupacionais?
12. Há um plano para monitorar a consistência entre lotes?
13. Os benefícios ambientais consideram toda a cadeia produtiva?
14. A comunicação comercial evita promessas superiores às evidências disponíveis?

Figura 22 – Protocolo integrado para identificação, controle de qualidade e validação de um biocarvão. *A identificação do biocarvão requer matéria-prima biogênica conhecida e sustentável, segregação de lotes suspeitos, registro das condições de produção, controle de emissões, amostragem rastreável, caracterização físico-química e avaliação de contaminantes. O produto candidato deve apresentar consistência entre lotes e ser testado para a finalidade declarada antes da ampliação de escala ou da comunicação comercial de benefícios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Hale et al. (2012), International Biochar Initiative (2014), Camps-Arbestain et al. (2015) e European Biochar Certificate (2024).

Se essas perguntas não puderem ser respondidas, o material deve ser descrito provisoriamente como carvão, resíduo carbonizado ou produto termoquímico, conforme o caso. A denominação mais cautelosa evita conferir legitimidade científica a um produto ainda não caracterizado.

4.20 Síntese do capítulo

Biocarvão, carvão vegetal, carvão ativado, hidrocarvão, biomassa torrificada, carvão de gaseificação e cinzas são materiais distintos, ainda que possam compartilhar matérias-primas ou características visuais. Sua diferenciação depende do processo, da finalidade, das propriedades e dos requisitos de segurança.

O biocarvão não constitui uma substância uniforme. Ele representa uma classe heterogênea de materiais cuja qualidade é condicionada pela matéria-prima, pelas condições de produção e pelos tratamentos posteriores. Os efeitos no solo e no ambiente são igualmente condicionais e devem ser demonstrados por análises e experimentos.

As Terras Pretas Amazônicas oferecem evidências importantes sobre a persistência e as funções do carbono pirogênico, mas não podem ser reduzidas à presença de carvão. São sistemas históricos, ecológicos e culturais complexos, formados pela interação prolongada entre manejo humano, resíduos orgânicos, nutrientes, minerais e atividade biológica.

A produção responsável de biocarvão requer rastreabilidade, caracterização, controle de contaminantes, gestão das emissões e definição prévia da finalidade. Também demanda atenção às particularidades territoriais da Amazônia, incluindo logística, sazonalidade, diversidade de solos, funções ecológicas dos resíduos e participação das comunidades.

Compreendidas essas diferenças, torna-se possível analisar como as tecnologias de conversão interferem na formação dos produtos. O próximo capítulo examinará os fundamentos da pirólise, da carbonização, da gaseificação, da carbonização hidrotérmica e de outros processos, destacando suas condições operacionais, rendimentos, coprodutos, emissões e possibilidades de implantação no contexto amazônico.

Referências

AHMAD, M. et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071. Acesso em: 18 set. 2026.

ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1021/ie0207919. Acesso em: 18 set. 2026.

CAMPS-ARBESTAIN, M.; AMONETTE, J. E.; SINGH, B.; WANG, T.; SCHMIDT, H.-P. A biochar classification system and associated test methods. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. p. 165-194. Disponível em: https://doi.org/10.4324/9780203762264-8. Acesso em: 18 set. 2026.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022. Acesso em: 18 set. 2026.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE — EBC. **Guidelines for a Sustainable Production of Biochar**. Version 10.4. Arbaz: Carbon Standards International, 2024. Disponível em: https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents. Acesso em: 18 set. 2026.

FUNKE, A.; ZIEGLER, F. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 4, n. 2, p. 160-177, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bbb.198. Acesso em: 18 set. 2026.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The "Terra Preta" phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, p. 37-41, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s001140000193. Acesso em: 18 set. 2026.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4. Acesso em: 18 set. 2026.

HALE, S. E. et al. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 5, p. 2830-2838, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1021/es203984k. Acesso em: 18 set. 2026.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE — IBI. **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil**. Version 2.0. 2014. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Standards_V2-0_final_2014.pdf. Acesso em: 18 set. 2026.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359-378, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050. Acesso em: 18 set. 2026.

KEILUWEIT, M.; NICO, P. S.; JOHNSON, M. G.; KLEBER, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 4, p. 1247-1253, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1021/es9031419. Acesso em: 18 set. 2026.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.4324/9780203762264. Acesso em: 18 set. 2026.

LIBRA, J. A. et al. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. **Biofuels**, v. 2, n. 1, p. 89-124, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.4155/bfs.10.81. Acesso em: 18 set. 2026.

RONSSE, F.; VAN HECKE, S.; DICKINSON, D.; PRINS, W. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 104-115, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1111/gcbb.12018. Acesso em: 18 set. 2026.

SCHMIDT, M. J. et al. Intentional creation of carbon-rich dark earth soils in the Amazon. **Science Advances**, v. 9, n. 38, eadh8499, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8499. Acesso em: 18 set. 2026.

SPOKAS, K. A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O molar ratios. **Carbon Management**, v. 1, n. 2, p. 289-303, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.4155/cmt.10.32. Acesso em: 18 set. 2026.

THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution: IUPAC technical report. **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117. Acesso em: 18 set. 2026.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748-3762, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023. Acesso em: 18 set. 2026.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1: phase-mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, v. 105, p. 40-76, 2013a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041. Acesso em: 18 set. 2026.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2: potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. **Fuel**, v. 105, p. 19-39, 2013b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001. Acesso em: 18 set. 2026.

YAHYA, M. A.; AL-QODAH, Z.; NGAH, C. W. Z. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, p. 218-235, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051. Acesso em: 18 set. 2026.

CAPÍTULO 5

TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSAS: PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO E PRODUTOS ASSOCIADOS

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Anne Cristina Barbosa Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruna Amanda Sousa Rodrigues
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Maria Carolina Sarto Fernandes Rodrigues
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Mauricio Willians de Lima
Universidade Estadual do Amapá (UEAP)

Joélly Luana Brito Santos
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Kalil Oliveira Belém
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Pedro Henrique Cardoso da Costa
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Amiel Johnson Cardoso Pimenta
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

DOI: 10.52832/wed.222.1291

Este capítulo examina como a preparação da biomassa, a tecnologia de conversão e o controle operacional determinam o rendimento, as propriedades e a segurança dos produtos carbonosos. Pirólise, carbonização, gaseificação, torrefação e carbonização hidrotérmica são apresentadas como rotas condicionadas pela matéria-prima, pela finalidade e pelo território. O objetivo não é indicar um equipamento universal, mas oferecer critérios para selecionar e operar sistemas compatíveis com a realidade amazônica.

5.1 A produção como sistema integrado

Uma unidade de produção de biocarvão deve ser compreendida como sistema integrado, e não apenas como reator. Esse sistema começa no local de geração da biomassa e inclui coleta, triagem, transporte, armazenamento, secagem, redução do tamanho, alimentação, conversão termoquímica, resfriamento, tratamento dos gases, preparação do produto e destinação dos coprodutos.

O desempenho do reator pode ser satisfatório enquanto o sistema completo permanece ambiental ou economicamente inadequado. Isso ocorre, por exemplo, quando a matéria-prima percorre distâncias excessivas, a secagem utiliza grande quantidade de combustível, os vapores são liberados sem controle ou o produto perde qualidade durante o armazenamento.

A tecnologia precisa ser selecionada a partir de uma finalidade claramente definida. Quando o objetivo principal é obter biocarvão para utilização no solo, busca-se conservar uma fração relevante do carbono no produto sólido e controlar contaminantes. Se a prioridade for a produção de bio-óleo, os parâmetros e o reator serão orientados para a rápida remoção e condensação dos vapores. Para geração de gás combustível, procura-se converter maior proporção da biomassa em gases.

Assim, a mesma unidade não maximiza simultaneamente todos os produtos. Aumentar o rendimento de biocarvão pode reduzir a produção de líquidos ou gases; elevar a estabilidade do carbono pode diminuir o número de grupos funcionais superficiais; e intensificar a carbonização pode elevar a concentração relativa de cinzas. A escolha tecnológica é, portanto, uma decisão entre objetivos e compromissos (Figura 23).

Figura 23 – Produção de biocarvão como sistema integrado. *A produção de biocarvão compreende uma sequência interdependente que se inicia na geração e seleção da biomassa e inclui coleta, preparação, alimentação, conversão termoquímica, resfriamento, tratamento de gases, manejo dos condensados, recuperação de energia, armazenamento e destinação dos produtos. O reator constitui apenas uma das etapas; falhas na logística, na secagem, no controle das emissões ou no armazenamento podem comprometer o desempenho ambiental, econômico e agronômico do sistema completo.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Antal e Grønli (2003), Roberts et al. (2010), Bridgwater (2012) e na síntese conceitual da seção 5.1.

5.2 Preparação da matéria-prima

5.2.1 Triagem e rastreabilidade

A preparação começa pela separação dos materiais. Biomassas limpas e de origem conhecida devem ser mantidas afastadas de plásticos, vidro, metais, solo, madeira tratada, tintas, adesivos e produtos químicos. A mistura realizada antes do processamento dificilmente pode ser corrigida depois.

A rastreabilidade deve registrar origem, data, processo gerador, composição presumida, condições de armazenamento e possíveis fontes de contaminação. Nos resíduos madeireiros, é necessário verificar a procedência legal da madeira e distinguir materiais naturais daqueles tratados com preservantes ou revestimentos.

A produção de biocarvão não destrói metais. Como a biomassa perde massa durante o processo, esses elementos podem ficar concentrados no sólido. Portanto, matéria-prima contaminada não se torna segura simplesmente porque foi submetida a temperaturas elevadas.

5.2.2 Umidade

A umidade exerce influência direta no consumo de energia. Antes que a temperatura da biomassa aumente suficientemente para que ocorram as principais reações de pirólise, parte da energia precisa evaporar a água.

Biomassas muito úmidas podem reduzir a temperatura do reator, prolongar o processamento, dificultar a ignição e aumentar a condensação de vapores. Em sistemas pouco controlados, essas condições podem elevar a formação de fumaça e produzir materiais carbonizados de maneira desigual.

Entretanto, a secagem excessiva também possui custo. O ponto adequado depende da tecnologia, da disponibilidade de calor residual e da estabilidade necessária para o armazenamento. A utilização do calor dos gases do processo pode reduzir o consumo de energia, desde que não promova incêndio, contaminação ou secagem descontrolada.

A carbonização hidrotérmica constitui uma alternativa para biomassas com grande quantidade de água, pois o processo ocorre em meio aquoso. Essa rota, contudo, gera uma fase líquida que precisa ser tratada e não deve ser considerada solução sem resíduos.

5.2.3 Tamanho e forma das partículas

O tamanho das partículas interfere na transferência de calor e na movimentação dos gases. Partículas grandes aquecem de maneira mais lenta e podem apresentar núcleo parcialmente convertido. Partículas muito pequenas aquecem rapidamente, mas produzem poeira, podem ser transportadas pelos gases e dificultar determinados sistemas de alimentação.

A uniformização granulométrica melhora o controle do processo. Contudo, trituração e peneiramento consomem energia e aumentam o desgaste dos equipamentos. Materiais duros, como caroços de frutos e ouriços da castanha-do-brasil, podem exigir máquinas mais resistentes.

A densificação em briquetes ou péletes facilita o transporte e a alimentação de determinadas unidades. Em contrapartida, compactação, adição de aglomerantes e alteração da porosidade podem modificar o comportamento térmico. Essas operações devem ser incluídas nos balanços de energia e de custos (Figura 24).

Figura 24 – Preparação e controle da matéria-prima para conversão termoquímica. *A preparação da biomassa requer segregação de materiais limpos e rastreáveis, exclusão de frações contaminadas, controle da umidade, secagem compatível com a tecnologia, redução de tamanho, peneiramento e, quando tecnicamente justificado, densificação. A uniformidade da alimentação melhora a transferência de calor e o controle operacional, mas trituração, secagem e compactação também consomem energia, provocam desgaste e podem gerar poeira; por isso, seus benefícios devem ser avaliados no balanço global do sistema.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Yang et al. (2007), Van der Stelt et al. (2011), Moser et al. (2023) e nas seções 5.2.1 a 5.2.3.

5.3 Fundamentos da conversão termoquímica

A biomassa lignocelulósica é formada principalmente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e componentes minerais. Esses constituintes apresentam comportamentos térmicos diferentes.

A hemicelulose geralmente se decompõe em uma faixa de temperatura mais baixa e relativamente estreita. A celulose apresenta decomposição intensa em uma faixa posterior, enquanto a lignina se transforma de maneira mais lenta e distribuída por intervalo amplo de temperaturas. As reações se sobrepõem e são influenciadas pela espécie vegetal, pelos minerais presentes e pelas condições de aquecimento (YANG et al., 2007).

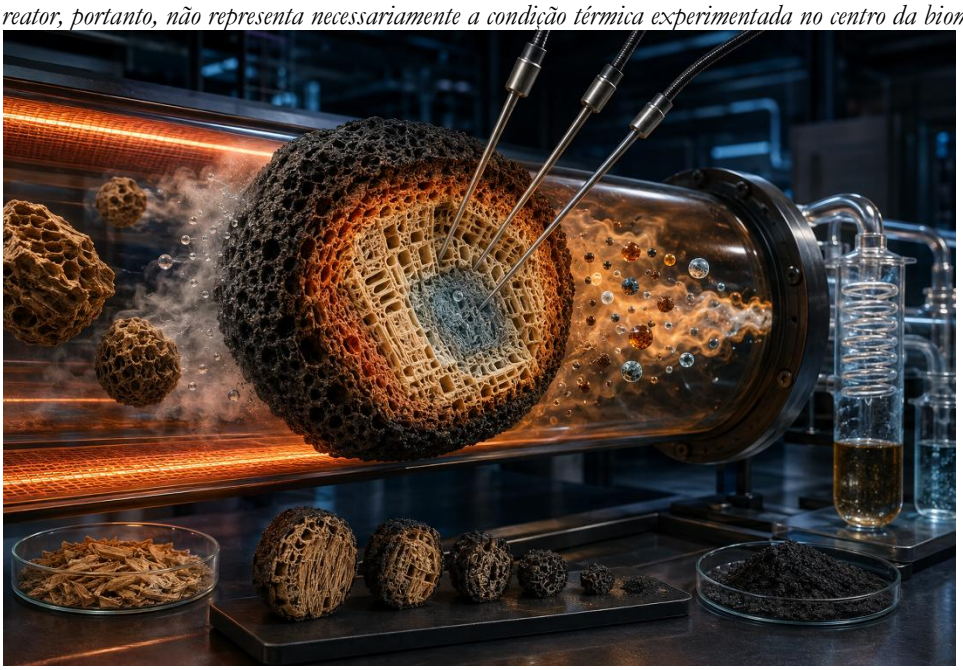
O processo pode ser dividido didaticamente em quatro etapas:

1. Aquecimento e remoção da água livre;
2. Liberação da água ligada e início da decomposição;
3. Devolatilização principal, com formação de vapores, gases e sólido carbonoso;
4. Transformação secundária do carvão e dos vapores.

Essa divisão não representa fronteiras rígidas. Reações de decomposição, condensação, fragmentação e reorganização molecular ocorrem simultaneamente. Os vapores primários podem sofrer reações secundárias dentro do reator, formando gases, alcatrões ou carbono adicional.

A transferência de calor é um dos principais fatores limitantes. O aquecimento ocorre primeiro na superfície e avança para o interior da partícula. Quanto maiores a partícula e a velocidade de alimentação, maior o risco de gradientes de temperatura. Por isso, a temperatura medida na parede ou no gás do reator nem sempre corresponde à temperatura efetivamente alcançada no centro da biomassa (Figura 25).

Figura 25 – Gradientes térmicos e etapas sobrepostas da conversão termoquímica da biomassa. *Durante a conversão termoquímica, o aquecimento progride da superfície para o interior da partícula. Remoção de água, decomposição de hemicelulose e celulose, transformação gradual da lignina, devolatilização e formação da estrutura carbonosa ocorrem em faixas parcialmente sobrepostas. Partículas grandes ou úmidas podem conservar um núcleo menos convertido, enquanto partículas muito finas aquecem rapidamente e podem ser arrastadas pelos gases. A temperatura medida na parede ou no gás do reator, portanto, não representa necessariamente a condição térmica experimentada no centro da biomassa.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Antal e Grønli (2003), Yang et al. (2007), Ronsse et al. (2013) e na seção 5.3.

5.4 Pirólise

Pirólise é a decomposição térmica de matéria orgânica em atmosfera sem oxigênio ou com disponibilidade suficientemente limitada para impedir combustão completa. Seus produtos são distribuídos entre uma fração sólida, vapores condensáveis e gases não condensáveis.

A fração sólida pode ser classificada como biocarvão quando sua matéria-prima, produção, qualidade e finalidade atendem aos requisitos correspondentes. Os vapores condensáveis originam uma mistura aquosa e orgânica frequentemente denominada bio-óleo ou líquido pirolenhoso, dependendo de composição, método de separação e contexto. Os gases não condensáveis podem incluir dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrogênio, metano e hidrocarbonetos leves.

O rendimento de cada fração depende da matéria-prima, temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, pressão, configuração do reator e velocidade de remoção dos vapores. Portanto, valores obtidos em uma instalação não devem ser transferidos diretamente para outra.

5.4.1 Pirólise lenta

A pirólise lenta emprega taxas de aquecimento relativamente baixas e maior tempo de permanência da biomassa no reator. É a rota mais frequentemente associada à produção de biocarvão porque tende a conservar maior proporção da massa inicial na fração sólida (MANYÀ, 2012).

As temperaturas utilizadas frequentemente se encontram entre aproximadamente 350 e 700 °C, mas essa faixa não constitui regra universal. O produto obtido em temperaturas mais baixas tende a apresentar maior rendimento em massa, mais materiais voláteis e maior presenças de grupos funcionais contendo oxigênio. Em temperaturas mais elevadas, o rendimento sólido geralmente diminui, enquanto aumentam a carbonização, a aromaticidade e, em muitos casos, a área superficial.

Ronsse et al. (2013) demonstraram que temperatura, tempo de residência e matéria-prima alteram significativamente as propriedades de biocarvões produzidos por pirólise lenta. Isso significa que expressões como "biocarvão produzido a 500 °C" são insuficientes. Também precisam ser registrados tempo, taxa de aquecimento, atmosfera, equipamento e forma de medição da temperatura.

5.4.2 Pirólise rápida

A pirólise rápida utiliza aquecimento intenso, partículas relativamente pequenas e curto tempo de residência dos vapores. Seu principal objetivo é maximizar a produção de líquidos condensáveis. Temperaturas próximas a 500 °C são comuns, mas variam de acordo com a tecnologia e a matéria-prima (Bridgwater, 2012).

A rápida remoção e o resfriamento dos vapores reduzem reações secundárias que poderiam convertê-los em gases ou carbono adicional. Reatores de leito fluidizado, transporte pneumático, cone rotativo e sistemas ablativos são exemplos utilizados nessa rota.

O sólido produzido pode apresentar propriedades adequadas a determinadas aplicações, mas seu rendimento é geralmente inferior ao observado em processos lentos orientados à produção de biocarvão. Além disso, partículas finas podem ser carregadas juntamente com os vapores, exigindo separação por ciclones ou filtros.

A pirólise rápida demanda controle operacional, alimentação regular, granulometria relativamente uniforme e sistemas eficientes de condensação. Essas exigências podem limitar sua implantação em locais com menor infraestrutura técnica.

5.4.3 Pirólise intermediária

A pirólise intermediária trabalha com condições entre as rotas lenta e rápida. Busca distribuir a biomassa entre sólidos, líquidos e gases sem maximizar exclusivamente uma fração.

Essa flexibilidade pode ser útil em sistemas nos quais o biocarvão e a energia possuem valor. Entretanto, a viabilidade depende da existência de uso ou mercado para os coprodutos. Produzir três frações sem condições de aproveitá-las pode apenas transformar um resíduo sólido em resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

5.5 Carbonização

A carbonização é um processo termoquímico historicamente orientado à produção de carvão. Ela pode ser entendida como uma forma de pirólise lenta na qual o produto sólido constitui o objetivo principal. O termo é frequentemente empregado na produção de carvão vegetal em fornos, retortas e sistemas artesanais.

Nos sistemas tradicionais, parte da própria biomassa é queimada para fornecer calor. O processo apresenta zonas com diferentes temperaturas e disponibilidade de oxigênio. Como resultado, o lote pode conter material pouco carbonizado, carvão adequadamente convertido e frações parcialmente queimadas.

O controle do ar é decisivo. Entrada insuficiente pode interromper o aquecimento; entrada excessiva provoca combustão do produto e redução do rendimento. Fornos sem recuperação ou combustão dos gases também podem emitir grande quantidade de fumaça, monóxido de carbono, metano, compostos orgânicos voláteis e partículas.

Retortas separam, em diferentes graus, a combustão que fornece calor da biomassa submetida à carbonização. Os vapores liberados podem ser conduzidos para uma câmara de combustão, fornecendo energia ao processo e reduzindo emissões de produtos incompletamente queimados.

Antal e Grønli (2003) destacam que rendimento e qualidade do carvão dependem de controle térmico, recuperação energética e compreensão das reações de formação do sólido. A simples substituição de um forno tradicional por um equipamento metálico não garante eficiência se a operação, a vedação e a circulação de gases permanecerem inadequadas.

5.6 Gaseificação

A gaseificação converte biomassa em mistura gasosa pela ação de calor e de quantidade controlada de agente oxidante. Podem ser utilizados ar, oxigênio, vapor de água ou combinações desses agentes.

As temperaturas são geralmente superiores às empregadas na pirólise lenta. O objetivo é transformar grande parte do carbono em gases como monóxido de carbono, hidrogênio, metano e dióxido de carbono. A composição depende do agente gaseificante, da temperatura, da pressão, da matéria-prima e do tipo de gaseificador (Molino; Chianese; Musmarra, 2016).

Os gaseificadores podem ser classificados, entre outras formas, como:

- Leito fixo de fluxo ascendente;
- Leito fixo de fluxo descendente;
- Leito fluidizado;
- Leito circulante;
- Fluxo de arraste.

Gaseificadores de fluxo ascendente podem apresentar boa eficiência térmica, mas produzir gás com maior concentração de alcatrões. Sistemas de fluxo descendente favorecem o craqueamento de parte desses compostos, embora sejam mais exigentes quanto a umidade e uniformidade da biomassa. Leitos fluidizados oferecem mistura e transferência de calor eficientes, mas possuem maior complexidade operacional.

O gás precisa ser resfriado e limpo antes de alimentar motores, turbinas ou determinados processos industriais. Partículas, alcatrões, compostos de enxofre, cloro e metais podem provocar incrustação, corrosão, entupimento e danos aos equipamentos.

A fração sólida residual pode conter carbono e minerais. Entretanto, como discutido no Capítulo 4, ela não deve ser automaticamente classificada como biocarvão. A exposição a temperaturas elevadas, agentes oxidantes, cinzas e contaminantes exige caracterização específica.

5.7 Carbonização hidrotérmica

A carbonização hidrotérmica transforma biomassa em água líquida aquecida sob pressão autogerada ou controlada. Temperaturas entre aproximadamente 180 e 250 °C são frequentemente utilizadas. A água atua como meio de reação e participa das transformações químicas.

Durante o processo ocorrem hidrólise, desidratação, descarboxilação, condensação e polimerização. O produto sólido é denominado hidrocarvão. Também são formadas uma fase líquida rica em compostos orgânicos dissolvidos e uma quantidade geralmente menor de gases (Funke; Ziegler, 2010).

A principal vantagem potencial é a capacidade de processar matérias-primas úmidas sem secagem completa. Essa característica pode ser relevante para resíduos alimentares, lodos, polpas e subprodutos agroindustriais.

Contudo, o processo exige reatores resistentes à pressão, válvulas, controle térmico e procedimentos rigorosos de segurança. O investimento e a manutenção podem ser superiores aos de sistemas atmosféricos simples.

A fase líquida não pode ser descartada sem avaliação. Ela pode apresentar alta carga orgânica, acidez, nutrientes e compostos fitotóxicos. Recuperação de substâncias, digestão anaeróbia, tratamento biológico ou outras rotas precisam ser estudadas de acordo com sua composição.

O hidrocarvão possui estrutura e estabilidade diferentes das observadas em biocarvões de pirólise. Seu uso no solo exige investigação própria e não deve ser presumido apenas com base na origem renovável da biomassa (Kambo; Dutta, 2015).

5.8 Torrefação

A torrefação é um tratamento térmico relativamente brando, normalmente realizado entre aproximadamente 200 e 300 °C sob atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio. O processo remove água e parte dos compostos voláteis, reduz a relação oxigênio/carbono e aumenta a densidade energética da biomassa.

A hemicelulose é intensamente afetada, enquanto parte da celulose e da lignina permanece menos transformada. O produto tende a apresentar melhor moagem e menor afinidade pela água que a biomassa original (Van Der Stelt et al., 2011).

A torrefação é utilizada principalmente como pré-tratamento para produção de combustíveis sólidos. Embora gere um material escuro e enriquecido em carbono, o grau de carbonização pode ser insuficiente para que seja classificado como biocarvão estável destinado ao solo.

Ela pode ser integrada à peletização, gaseificação ou pirólise. Entretanto, cada etapa adicionada aumenta o consumo energético e a complexidade, devendo demonstrar benefício técnico ou econômico.

5.9 Tipos de reatores

5.9.1 Reatores de leito fixo

Nos reatores de leito fixo, a biomassa permanece relativamente imóvel durante grande parte da conversão. Eles podem operar em batelada ou em ciclos semicontínuos.

A simplicidade construtiva favorece aplicação em pequena escala. Em contrapartida, a transferência de calor pode ser desigual, sobretudo em leitos espessos ou com partículas heterogêneas. O centro do leito pode receber menos calor que as regiões próximas à parede.

O monitoramento deve incluir temperaturas em diferentes posições. Medir apenas a parede externa pode ocultar variações no interior da carga.

5.9.2 Fornos e retortas

Fornos tradicionais utilizam combustão parcial da biomassa para fornecer calor. Retortas procuram controlar melhor a atmosfera e direcionar os vapores para combustão ou recuperação.

Sistemas metálicos podem responder rapidamente às mudanças de temperatura, mas também perdem calor se não houver isolamento. Equipamentos de alvenaria apresentam maior inércia térmica e podem exigir ciclos mais longos.

A eficiência depende de vedação, isolamento, distribuição do ar, geometria, carga, treinamento dos operadores e destino dos gases. A denominação comercial do equipamento não substitui a avaliação de desempenho.

5.9.3 Reatores de rosca ou parafuso

Os reatores de rosca transportam a biomassa por um tubo aquecido utilizando um parafuso rotativo. Podem operar continuamente e controlar o tempo médio de permanência por meio da velocidade de rotação e da alimentação.

Entre suas vantagens estão construção relativamente compacta, menor necessidade de gás de arraste e possibilidade de modularização. As limitações incluem desgaste mecânico, consumo de energia, risco de obstrução e sensibilidade a partículas muito grandes ou fibrosas.

Moser et al. (2023) destacam que reatores de rosca e fornos rotativos apresentam diferenças importantes de capacidade, transferência de calor, escalabilidade e controle do tempo de residência.

5.9.4 Fornos rotativos

O forno rotativo consiste em cilindro inclinado que gira lentamente, promovendo deslocamento e mistura da biomassa. O aquecimento pode ser direto ou indireto.

A movimentação favorece contato com as superfícies aquecidas e permite processar materiais relativamente heterogêneos. Esses equipamentos podem alcançar capacidades maiores, mas requerem controle da vedação nas zonas de entrada e saída.

O movimento também pode causar fragmentação e formação de partículas finas. Velocidade de rotação, inclinação, nível de enchimento e tempo de residência precisam ser ajustados de forma conjunta.

5.9.5 Reatores de leito fluidizado

No leito fluidizado, um fluxo de gás mantém partículas sólidas em movimento semelhante ao de um fluido. A mistura proporciona transferência de calor rápida e temperatura relativamente uniforme.

Essas características favorecem a pirólise rápida e a gaseificação. Entretanto, a tecnologia exige partículas pequenas e controladas, consumo energético para movimentar o gás, separação de partículas e operação especializada.

Para resíduos fibrosos, úmidos ou de granulometria irregular, o pré-tratamento pode representar parcela expressiva do custo.

5.9.6 Fornos de cortina de chama

Os fornos de cortina de chama utilizam a chama e a camada de gases quentes na superfície para reduzir a entrada de oxigênio nas camadas inferiores. A biomassa é adicionada progressivamente e o processo é interrompido antes da combustão completa do carvão.

Estudos demonstram que esses sistemas podem produzir carvão de qualidade aceitável em escala de propriedade, desde que sejam operados com biomassa seca e procedimentos adequados (Cornelissen et al., 2016).

Apesar da simplicidade, o desempenho depende fortemente do operador, das condições climáticas, da forma do material e do momento de encerramento. Também são necessários cuidados com incêndios, fumaça, poeira e resfriamento.

5.9.7 Reatores hidrotérmicos

Os reatores de carbonização hidrotérmica podem operar em batelada ou continuamente. Devem suportar pressão, temperatura e possíveis condições corrosivas.

Os sistemas em batelada facilitam pesquisas e processamento de quantidades menores, mas apresentam períodos de aquecimento, reação, resfriamento e descarga. Sistemas contínuos podem aumentar a produtividade, porém o bombeamento de suspensões e a prevenção de obstruções são desafios relevantes.

5.10 Parâmetros operacionais

5.10.1 Temperatura máxima de tratamento

A temperatura máxima de tratamento é um dos parâmetros mais estudados. Seu aumento geralmente reduz o rendimento sólido, diminui materiais voláteis e aumenta o teor relativo de carbono fixo e cinzas.

Temperaturas mais elevadas tendem a promover maior aromaticidade e estabilidade. Também podem ampliar a área superficial, embora o comportamento dependa da matéria-prima e da formação ou obstrução dos poros.

A alcalinidade frequentemente aumenta porque os componentes minerais ficam concentrados. Contudo, temperaturas excessivas podem volatilizar elementos, favorecer sinterização mineral, reduzir grupos funcionais e consumir parte do carbono.

Nos resíduos de açaí, Sato et al. (2019) demonstraram que temperatura e tempo de residência modificaram rendimento, composição, estabilidade e propriedades relacionadas ao uso agrícola. Esses resultados reforçam que parâmetros definidos para madeira não devem ser transferidos automaticamente para caroços e fibras.

5.10.2 Taxa de aquecimento

A taxa de aquecimento expressa a velocidade com que a temperatura da biomassa aumenta. Taxas baixas favorecem conversão gradual e maior interação entre o sólido e os vapores. Taxas elevadas favorecem liberação rápida de voláteis e são características da pirólise rápida.

Entretanto, a taxa programada no equipamento não representa necessariamente a taxa experimentada pelo centro das partículas. Resistência à transferência de calor, umidade e granulometria criam diferenças.

Esse aspecto dificulta a comparação entre estudos. Uma mufla de laboratório, um reator tubular, um forno de alvenaria e uma unidade contínua podem apresentar produtos diferentes, mesmo quando informam a mesma temperatura máxima.

5.10.3 Tempo de residência

É necessário distinguir tempo de residência do sólido e tempo de residência dos vapores. O primeiro corresponde ao período durante o qual a biomassa ou o carvão permanece na zona aquecida. O segundo representa o tempo em que os vapores permanecem em condições que permitem reações secundárias.

Permanência prolongada do sólido pode intensificar a carbonização até determinado ponto. Vapores mantidos por mais tempo em contato com superfícies quentes podem formar gases, alcatrões ou depósitos de carbono.

Em reatores contínuos, o tempo real apresenta distribuição, e não um único valor. Parte das partículas pode atravessar o equipamento mais rapidamente que outra.

5.10.4 Atmosfera e entrada de oxigênio

Gases inertes, como nitrogênio, são frequentemente usados em pesquisas para evitar oxidação. Em escala comercial, seu consumo pode ser economicamente inviável. Muitas unidades utilizam gases recirculados ou mantêm atmosfera pobre em oxigênio por controle da vedação.

Pequenas entradas de ar podem fornecer calor por oxidação parcial. Contudo, variações não controladas alteram temperatura, rendimento e emissões. Também podem produzir pontos de combustão capazes de consumir o biocarvão.

A medição de oxigênio, monóxido de carbono, temperatura e pressão auxilia o controle, especialmente em unidades contínuas.

5.10.5 Pressão

A maior parte dos sistemas de pirólise para biocarvão opera próxima à pressão atmosférica. Alterações de pressão modificam a movimentação e as reações dos vapores, mas aumentam a complexidade do equipamento.

Na carbonização hidrotérmica, a pressão é necessária para manter a água no estado líquido. Falhas em válvulas, conexões ou sistemas de alívio podem provocar acidentes graves. O dimensionamento precisa seguir normas de vasos de pressão e procedimentos de inspeção.

5.10.6 Resfriamento

O biocarvão permanece reativo após sair do reator. Se entrar em contato com ar enquanto estiver quente, pode oxidar, perder massa ou reiniciar a combustão.

O resfriamento pode ocorrer em recipiente fechado, atmosfera controlada ou por contato cuidadosamente planejado com água. O uso de água reduz rapidamente a temperatura, mas pode carregar cinzas, compostos solúveis e contaminantes, gerando efluente.

O produto aparentemente frio na superfície pode manter regiões quentes em seu interior. Antes do armazenamento, deve ser verificada a estabilidade térmica do lote.

5.11 Coprodutos e integração energética

Os vapores liberados durante a pirólise contêm água e grande diversidade de compostos orgânicos. Quando resfriados, formam uma fase líquida complexa. Sua composição depende da matéria-prima, do processo e do sistema de condensação.

O bio-óleo geralmente apresenta água, ácidos, aldeídos, cetonas, açúcares derivados, fenóis e compostos de maior massa molecular. Ele não é equivalente ao petróleo e pode apresentar acidez, instabilidade e tendência à separação de fases.

O líquido pirolenhoso utilizado em determinadas atividades agrícolas necessita de controle de composição e segurança. Condensados brutos podem conter fenóis, metanol, ácidos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Origem natural não significa ausência de toxicidade.

Os gases não condensáveis podem ser queimados para fornecer calor ao processo. Essa integração reduz consumo externo de combustível e emissões de metano e monóxido de carbono, desde que a combustão seja eficiente.

O calor residual pode ser utilizado na secagem da matéria-prima, aquecimento de água ou outros processos locais. Contudo, a instalação de cada sistema de recuperação precisa considerar a regularidade da demanda e o custo dos equipamentos.

A circularidade ocorre quando os coprodutos substituem recursos ou energia de maneira segura. Queimar gases em uma chama aberta, descartar condensados ou acumular alcatrões não representa recuperação integral.

5.12 Emissões atmosféricas

A produção termoquímica pode emitir material particulado, monóxido de carbono, metano, compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e óxidos de nitrogênio. As emissões dependem da matéria-prima, da entrada de ar, da temperatura e do tratamento dos gases.

Sparrevik et al. (2015) observaram diferenças importantes entre sistemas tradicionais e retortas melhoradas, demonstrando que a tecnologia e a combustão dos vapores modificam o perfil das emissões. Cornelissen et al. (2016) também mostraram que fornos de cortina de chama podem apresentar desempenho melhor que métodos abertos quando operados adequadamente.

Entre as medidas de controle estão:

- Alimentação de biomassa com umidade adequada;
- Vedação e controle da entrada de ar;
- Combustão secundária dos gases;
- Tempo e temperatura suficientes na câmara de combustão;

- Separação de partículas;
- Condensação controlada;
- Monitoramento das emissões;
- Manutenção preventiva.

A fumaça visível constitui sinal de combustão incompleta, mas sua ausência não comprova emissão segura. Monóxido de carbono e outros gases podem estar presentes sem coloração evidente.

Unidades instaladas próximas a residências, escolas, trabalhadores ou áreas de processamento de alimentos exigem atenção especial. O benefício de transformar resíduos não justifica transferir poluição atmosférica às comunidades.

5.13 Segurança operacional

Os principais riscos incluem queimaduras, incêndios, explosões de poeira, intoxicação por monóxido de carbono, contato com condensados, partes móveis, superfícies aquecidas e pressurização.

O monóxido de carbono é incolor e pode se acumular em espaços fechados. Reatores e fornos nunca devem ser operados em locais sem ventilação adequada. A medição do gás é recomendável em áreas ocupacionais.

Poeira fina de biocarvão pode ser inalada e, em determinadas concentrações, formar atmosfera explosiva. Moagem, peneiramento e ensacamento precisam de controle de poeira e eliminação de fontes de ignição.

Procedimentos operacionais devem incluir:

- Inspeção antes da partida;
- Sequência segura de aquecimento;
- Controle da alimentação;
- Acompanhamento da temperatura;
- Procedimentos de interrupção;
- Resfriamento completo;
- Resposta a incêndios;
- Uso de equipamentos de proteção;
- Registro das ocorrências.

Automação pode melhorar o controle, mas não elimina a necessidade de treinamento. Sensores sem calibração ou manutenção podem transmitir falsa sensação de segurança (Figura 26).

Figura 26 – Controle integrado de emissões e segurança operacional na produção de biocarvão. *O controle ambiental e ocupacional combina vedação do reator, combustão secundária dos gases, separação de partículas, condensação controlada, filtração, monitoramento da chaminé, recuperação de calor e manejo seguro do biocarvão e dos condensados. Ventilação, detecção de monóxido de carbono, controle de poeira, equipamentos de proteção, barreiras para superfícies aquecidas, prevenção de incêndios e procedimentos de emergência são indispensáveis. A ausência de fumaça visível não comprova emissão segura nem substitui medições, manutenção e treinamento.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Sparrevik et al. (2015), Cornelissen et al. (2016), International Biochar Initiative (2014), European Biochar Certificate (2024) e nas seções 5.12 e 5.13.

5.14 Seleção tecnológica para a Amazônia

A seleção deve começar pela quantidade sustentável de biomassa, e não pela capacidade nominal oferecida pelo fabricante. Uma unidade superdimensionada opera com ociosidade ou passa a disputar materiais empregados em outras atividades.

Em localidades com fluxos pequenos e dispersos, unidades modulares ou descentralizadas podem reduzir o transporte da biomassa úmida e volumosa. O biocarvão, mais seco e geralmente mais estável, pode ser transportado posteriormente.

Entretanto, descentralização também distribui a necessidade de treinamento, manutenção, monitoramento e controle de qualidade. Instalar muitos equipamentos simples sem assistência técnica pode produzir lotes inconsistentes e emissões elevadas.

Unidades centralizadas podem oferecer controle mais rigoroso, recuperação energética e análises frequentes. Sua viabilidade depende de fornecimento regular, infraestrutura de transporte, mercado e uso dos coprodutos.

Para cadeias sazonais, como diferentes frutos amazônicos, o equipamento pode precisar processar mais de uma biomassa. Essa flexibilidade deve ser testada, pois materiais com densidade, umidade e composição diferentes exigem ajustes operacionais.

No caso do açaí, a concentração dos caroços em batedores e agroindústrias favorece a coleta, mas umidade, fibras aderidas e decomposição podem dificultar armazenamento. A secagem próxima ao ponto de geração pode reduzir massa transportada e deterioração.

As escolhas devem considerar também:

- Disponibilidade de peças e assistência;
- Qualificação dos operadores;
- Estabilidade do fornecimento elétrico;
- Acesso a laboratórios;
- Possibilidade de uso do calor;
- Distância das áreas de aplicação;
- Licenciamento e controle de emissões;
- Participação das comunidades;
- Distribuição dos benefícios econômicos.

Tecnologia adequada é aquela que pode ser operada, mantida e monitorada no território ao longo do tempo.

5.15 Comparação das rotas tecnológicas

Quadro 5 – Comparação entre as principais tecnologias de conversão

Tecnologia	Condições predominantes	Produto priorizado	Principais vantagens	Limitações e cuidados
Pirólise lenta	Aquecimento relativamente lento, atmosfera pobre em oxigênio e maior permanência do sólido	Biocarvão	Maior rendimento sólido e possibilidade de recuperação energética	Processo demorado; a qualidade depende do controle térmico e da matéria-prima
Pirólise rápida	Aquecimento intenso, partículas pequenas e rápida remoção dos vapores	Bio-óleo	Elevada produção de líquidos e possibilidade de operação contínua	Exige controle rigoroso, secagem, redução granulométrica e condensação eficiente
Pirólise intermediária	Condições entre as rotas lenta e rápida	Sólidos, líquidos e gases	Flexibilidade na distribuição dos produtos	Pode gerar diferentes frações sem mercado ou aproveitamento definido
Carbonização	Aquecimento lento, geralmente realizado em fornos ou retortas	Carvão sólido	Tecnologia conhecida e aplicável em diferentes escalas	Sistemas tradicionais podem apresentar baixo rendimento e emissões elevadas
Gaseificação	Temperatura elevada e fornecimento controlado de ar, oxigênio ou vapor	Gás combustível ou gás de síntese	Conversão energética eficiente em sistemas adequadamente projetados	Formação de alcatrões, necessidade de limpeza do gás e menor rendimento de carvão
Carbonização hidrotérmica	Biomassa em água aquecida e pressurizada	Hidrocarvão	Possibilidade de processar matérias-primas úmidas	Exige reator pressurizado, maior investimento e

				tratamento da fase líquida
Torrefação	Tratamento térmico brando em baixa disponibilidade de oxigênio	Combustível sólido torrificado	Melhora a moagem, o armazenamento e a densidade energética da biomassa	Produto menos carbonizado e geralmente menos estável que o biocarvão
Cortina de chama	Adição progressiva de biomassa sob uma camada superficial de chama	Carvão ou biocarvão em pequena escala	Construção simples e possibilidade de uso descentralizado	Forte dependência do operador, da umidade da biomassa e das condições ambientais

Fonte: Elaboração autoral com base em Antal e Grønli (2003), Funke e Ziegler (2010), Bridgwater (2012), Manyà (2012), Molino, Chianese e Musmarra (2016), Cornelissen et al. (2016) e Moser et al. (2023).

5.16 Controle de qualidade e aumento de escala

O desenvolvimento de uma tecnologia costuma começar em laboratório, avançar para unidade piloto e somente depois alcançar escala comercial. Cada transição introduz desafios.

Em laboratório, pequenas amostras podem apresentar aquecimento relativamente uniforme. Em reatores maiores surgem gradientes, zonas mortas, variação no tempo de residência, perda de calor e dificuldade de controle da alimentação.

Um resultado obtido em mufla não representa necessariamente o produto de um forno comercial. A mufla pode permitir entrada de oxigênio, enquanto um reator tubular utiliza gás inerte. A massa da amostra, a geometria e o contato com os vapores também são diferentes.

O aumento de escala precisa validar:

- Capacidade real de alimentação;
- Distribuição das temperaturas;
- Rendimento em base seca;
- Conservação do carbono;
- Consumo de energia;
- Emissões;
- Composição dos coprodutos;
- Segurança;
- Consistência entre lotes;
- Qualidade do biocarvão.

O controle deve incluir amostragens periódicas e registro dos parâmetros. Um lote não deve ser caracterizado apenas pelos valores nominais do equipamento.

Os sistemas de certificação, como aqueles propostos pela International Biochar Initiative e pelo European Biochar Certificate, estabelecem critérios para matérias-primas, propriedades e contaminantes. Esses documentos auxiliam o controle, mas não substituem a demonstração de eficácia para cada uso (IBI, 2014; EBC, 2024).

5.17 Avaliação ambiental e energética

Uma tecnologia somente pode ser considerada ambientalmente vantajosa quando todo o sistema é avaliado. A análise deve incluir impactos evitados pelo manejo do resíduo e impactos introduzidos pela nova operação.

Roberts et al. (2010) demonstraram, por meio de avaliação de ciclo de vida, que o desempenho climático dos sistemas de biocarvão depende de matéria-prima, energia, transporte, rendimento, uso dos coprodutos e destino do produto.

Entre os componentes que precisam integrar a avaliação estão:

- Emissões evitadas no manejo anterior;
- Energia utilizada na coleta e preparação;
- Transporte;
- Emissões diretas do reator;
- Consumo de eletricidade;
- Substituição de combustíveis;
- Permanência do carbono;
- Aplicação e transporte do biocarvão;
- Tratamento dos líquidos e gases;
- Infraestrutura do sistema.

Não se deve contabilizar como benefício toda a energia dos gases quando eles não são efetivamente aproveitados. Da mesma forma, o armazenamento bruto de carbono no produto não corresponde automaticamente à remoção líquida de dióxido de carbono (Figura 27).

Figura 27 – Seleção tecnológica e escalonamento territorial de sistemas de biocarvão na Amazônia. *A configuração tecnológica deve responder à quantidade, à localização e à sazonalidade da biomassa, à infraestrutura disponível e à capacidade permanente de operação, manutenção e controle. Unidades modulares próximas às fontes podem reduzir o transporte de resíduos úmidos e volumosos, enquanto instalações centralizadas podem oferecer maior recuperação energética, monitoramento e regularidade. A transição entre laboratório, escala piloto e operação comercial precisa validar balanços de massa e energia, emissões, segurança, consistência dos lotes, uso dos coprodutos, logística e distribuição dos benefícios no território.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Roberts et al. (2010), Cornelissen et al. (2016), Moser et al. (2023) e na síntese das seções 5.14 a 5.17.

5.18 Síntese do capítulo

A produção de biocarvão é resultado de um sistema que começa na geração da biomassa e termina na utilização segura dos produtos e coprodutos. O reator representa apenas uma das etapas.

A pirólise lenta é a rota mais diretamente associada à produção de biocarvão, mas seu desempenho depende de temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, atmosfera, granulometria e umidade. A pirólise rápida favorece líquidos; a gaseificação prioriza gases; a carbonização hidrotérmica processa biomassas úmidas; e a torrefação produz combustíveis sólidos menos intensamente carbonizados.

Reatores de leito fixo, retortas, roscas, fornos rotativos, leitos fluidizados e fornos de cortina de chama apresentam vantagens e limitações. A escolha precisa considerar quantidade e regularidade da biomassa, produto desejado, infraestrutura, capacidade técnica, emissões e segurança.

Na Amazônia, sistemas descentralizados podem reduzir custos logísticos, enquanto unidades centralizadas podem oferecer maior controle. Nenhuma dessas alternativas é adequada por definição. A decisão deve resultar de diagnóstico territorial, balanço de massa e energia, análise ambiental e participação dos atores envolvidos.

O controle das emissões e dos riscos ocupacionais é condição básica. Uma tecnologia não pode ser considerada sustentável quando produz biocarvão à custa da exposição dos trabalhadores ou da poluição das comunidades.

O próximo capítulo apresentará os procedimentos de caracterização, controle de qualidade e avaliação da segurança do biocarvão, estabelecendo a base analítica necessária para interpretar suas aplicações agrícolas e ambientais.

REFERÊNCIAS

AL-RUMAIHI, A.; SHAHBAZ, M.; MCKAY, G.; MACKEY, H.; AL-ANSARI, T. A review of pyrolysis technologies and feedstock: a blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, 112715, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715

ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, 2003. DOI: https://doi.org/10.1021/ie0207919

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

CORNELISSEN, G.; PANDIT, N. R.; TAYLOR, P.; PANDIT, B. H.; SPARREVIK, M.; SCHMIDT, H. P. Emissions and char quality of flame-curtain "Kon Tiki" kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, e0154617, 2016. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617

CROMBIE, K.; MAŠEK, O.; SOHI, S. P.; BROWNSORT, P.; CROSS, A. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 122-131, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12030

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE (EBC). **Guidelines for a sustainable production of biochar**. Version 10.4. Arbaz: Carbon Standards International, 2024. Disponível em: https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents. Acesso em: 17 set. 2026.

FUNKE, A.; ZIEGLER, F. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 4, n. 2, p. 160-177, 2010. DOI: https://doi.org/10.1002/bbb.198

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**. Version 2.0. 2014. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Standards_V2-0_final_2014.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

KAMBO, H. S.; DUTTA, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 359-378, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050

MANYÀ, J. J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 15, p. 7939-7954, 2012. DOI: https://doi.org/10.1021/es301029g

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: the state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, v. 25, n. 1, p. 10-25, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005

MOSER, K.; WOPIENKA, E.; PFEIFER, C.; SCHWARZ, M.; SEDLMAYER, I.; HASLINGER, W. Screw reactors and rotary kilns in biochar production: a comparative review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 174, 106112, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106112

ROBERTS, K. G.; GLOY, B. A.; JOSEPH, S.; SCOTT, N. R.; LEHMANN, J. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 827-833, 2010. DOI: https://doi.org/10.1021/es902266r

RONSSE, F.; VAN HECKE, S.; DICKINSON, D.; PRINS, W. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 104-115, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12018

SATO, M. K. et al. Biochar from açaí agroindustry waste: study of pyrolysis conditions. **Waste Management**, v. 96, p. 158-167, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.022

SPARREVIK, M.; ADAM, C.; MARTINSEN, V.; JUBAEDAH; CORNELISSEN, G. Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved retort kilns. **Biomass and Bioenergy**, v. 72, p. 65-73, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.016

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748-3762, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

CAPÍTULO 6

CARACTERIZAÇÃO, CONTROLE DE QUALIDADE E SEGURANÇA DO BIOCARVÃO

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Anne Cristina Barbosa Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

João Victor Costa Rezende
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Lucas Lima Amorim
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Joélly Luana Brito Santos
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Antônia Kelly de Abreu Lobo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Pedro Henrique Cardoso da Costa
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Amiel Johnson Cardoso Pimenta
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

DOI: 10.52832/wed.222.1293

Este capítulo apresenta a caracterização do biocarvão como uma cadeia de evidências que começa na amostragem e termina na decisão sobre seu uso. Propriedades físicas, composição elementar, estabilidade do carbono, nutrientes, contaminantes e respostas biológicas precisam ser determinadas por métodos adequados e interpretadas em conjunto. O objetivo não é definir um biocarvão universalmente ideal, mas estabelecer critérios para demonstrar identidade, consistência, qualidade e segurança em cada finalidade.

6.1 Da aparência do material à identidade do produto

A aparência escura, a baixa densidade e a presença de carbono não são suficientes para determinar a identidade ou a qualidade de um biocarvão. Materiais visualmente semelhantes podem apresentar diferenças expressivas de composição, estabilidade, salinidade, porosidade e concentração de contaminantes.

Como discutido nos capítulos anteriores, essas diferenças resultam da interação entre matéria-prima, tecnologia, temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento, atmosfera, resfriamento e tratamentos posteriores. A caracterização transforma esse histórico produtivo em informações mensuráveis.

A qualidade não deve ser entendida como atributo absoluto. Um biocarvão adequado para corrigir a acidez de determinado solo pode ser inadequado para uma cultura sensível à salinidade. Um produto eficiente como adsorvente pode conter concentrações de contaminantes incompatíveis com o uso agrícola. Da mesma forma, um material seguro para incorporação em um produto industrial não será necessariamente autorizado para aplicação no solo.

A caracterização precisa responder a quatro perguntas:

1. Qual é a identidade do material;
2. Quais propriedades ele apresenta;
3. Essas propriedades são consistentes entre os lotes;
4. O material é eficaz e seguro para a finalidade pretendida?

Essas perguntas exigem informações de diferentes níveis. Algumas são obtidas por registros de produção; outras dependem de análises laboratoriais; e determinadas aplicações exigem ensaios biológicos ou experimentos específicos.

A caracterização também não deve ser confundida com certificação. Um relatório laboratorial descreve a amostra analisada. A certificação envolve requisitos adicionais de produção, rastreabilidade, controle, amostragem, auditoria e atendimento a limites estabelecidos. Da mesma maneira, a certificação não garante que o produto produzirá benefício agronômico em qualquer solo (Figura 28).

Figura 28 – Caracterização do biocarvão como cadeia integrada de evidências. *A demonstração de identidade, qualidade e segurança começa com matéria-prima e lote conhecidos e prossegue por amostragem representativa, preparação adequada, análises físicas e químicas, avaliação estrutural, ensaios biológicos, comparação entre lotes e interpretação orientada à finalidade. Cada etapa depende da anterior; por isso, precisão instrumental, certificação ou resultado isolado não compensam falhas de rastreabilidade, amostragem ou adequação do método. A decisão final deve integrar evidências de identidade, consistência, eficácia e segurança para o uso pretendido.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em International Biochar Initiative (2014), Camps-Arbestain et al. (2015), Singh, Camps-Arbestain e Lehmann (2017), European Biochar Certificate (2025) e na síntese da seção 6.1.

6.2 Definição de lote e rastreabilidade

A análise laboratorial só possui significado quando a amostra pode ser relacionada a um lote conhecido. Um lote deve reunir material produzido com matéria-prima e condições suficientemente uniformes para ser tratado como uma unidade de controle.

A definição precisa considerar:

- Tipo e origem da matéria-prima;
- Proporção das biomassas em misturas;
- Período de produção;
- Tecnologia utilizada;
- Temperatura e tempo de residência;
- Condições de resfriamento;
- Tratamentos posteriores;
- Local e condições de armazenamento.

Mudanças importantes na matéria-prima ou no processo podem originar produto diferente. A substituição de resíduos lenhosos por esterco, a alteração da temperatura máxima ou a

incorporação de material mineral, por exemplo, justificam a formação de outro lote e nova avaliação.

O código do lote deve acompanhar o produto desde sua produção até o destino final. Esse código pode ser associado a uma ficha contendo data, operador, equipamento, matéria-prima, parâmetros, rendimento, resultados laboratoriais e movimentações posteriores.

A rastreabilidade permite investigar desvios, realizar recolhimentos e comparar desempenho. Sem ela, um resultado laboratorial positivo pode ser indevidamente utilizado para representar produtos obtidos em outras condições.

Em unidades comunitárias ou de pequena escala, o sistema não precisa ser excessivamente complexo. Registros em planilhas, cadernos padronizados ou formulários digitais podem ser suficientes, desde que sejam completos, legíveis e mantidos ao longo do tempo.

6.3 Amostragem representativa

A amostragem constitui uma das etapas mais críticas da caracterização. Um laboratório pode produzir resultado analiticamente preciso para uma amostra que não representa o lote. Nesse caso, a precisão instrumental não corrige o erro de amostragem.

Biocarvões podem apresentar heterogeneidade devido à distribuição desigual da temperatura, mistura de matérias-primas, fragmentação, concentração de cinzas e separação das partículas durante o transporte. Partículas finas podem acumular-se em determinadas regiões, enquanto fragmentos maiores permanecem em outras.

A amostra deve ser formada por incrementos coletados em diferentes pontos ou momentos. Em unidades contínuas, podem ser retiradas pequenas quantidades ao longo do período de produção. Em pilhas ou recipientes, os incrementos devem representar diferentes posições e profundidades.

Depois da coleta, os incrementos são reunidos para formar uma amostra composta. Essa amostra precisa ser homogeneizada e reduzida até o volume enviado ao laboratório. A redução deve conservar as proporções das diferentes partículas e não simplesmente retirar material da superfície.

A ficha de amostragem deve registrar:

- Identificação do lote;
- Massa ou volume representado;
- Data, horário e local;
- Número de incrementos;
- Procedimento de coleta;

- Nome do responsável;
- Condições do material;
- Forma de embalagem e transporte;
- Análises solicitadas.

Uma segunda porção deve ser mantida como amostra de retenção. Ela possibilita repetir análises ou investigar divergências. O prazo e as condições de armazenamento precisam ser definidos considerando umidade, oxidação e contaminação.

Os sistemas da International Biochar Initiative e do European Biochar Certificate estabelecem procedimentos de formação de amostras compostas e controle dos lotes. Contudo, o protocolo deve ser adaptado à unidade produtiva sem perder o princípio fundamental de representatividade (IBI, 2014; EBC, 2025).

6.4 Preparação e conservação das amostras

Nem todas as análises devem ser realizadas na mesma forma de amostra. Distribuição granulométrica e densidade aparente, por exemplo, precisam representar o produto como recebido. Análises químicas geralmente exigem homogeneização e moagem.

A secagem facilita a moagem e a conservação, mas pode alterar compostos voláteis, comunidades microbianas e determinadas propriedades superficiais. Por isso, o procedimento deve ser compatível com o objetivo analítico.

A moagem também modifica o material. Ela aumenta a superfície exposta, rompe poros e mistura frações minerais e carbonosas. Uma amostra finamente moída pode ser adequada para determinação elementar, mas não representa a estrutura física do produto aplicado ao solo.

Os equipamentos de moagem precisam ser selecionados para evitar contaminação. Moinhos metálicos podem introduzir ferro, cromo ou níquel, sobretudo quando processam materiais duros. Recipientes, espátulas e peneiras também devem estar limpos.

A embalagem precisa impedir perda, absorção de umidade e contaminação. Recipientes devem ser identificados com código permanente, evitando informações registradas apenas em tampas removíveis.

O relatório deve indicar o estado da amostra, o método de secagem, o tamanho de moagem e a base de expressão dos resultados. A ausência dessas informações dificulta a comparação entre estudos e laboratórios (Figura 29).

Figura 29 – Amostragem representativa, preparação e conservação de amostras de biocarvão. *Uma amostra representativa é formada por incrementos coletados em diferentes pontos, profundidades ou momentos do lote. Os incrementos são reunidos, homogeneizados e reduzidos sem alterar indevidamente as proporções entre partículas finas, fragmentos maiores e componentes minerais. A amostra destinada ao laboratório e a amostra de retenção devem permanecer identificadas, seladas, protegidas contra umidade e contaminação e vinculadas ao histórico do lote. Secagem, moagem, peneiramento, embalagem e transporte precisam ser escolhidos de acordo com a análise pretendida e registrados no relatório.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em International Biochar Initiative (2014), Singh, Camps-Arbestain e Lehmann (2017), European Biochar Certificate (2025) e nas seções 6.2 a 6.4.

6.5 Caracterização física

6.5.1 Umidade e matéria seca

A umidade interfere no armazenamento, no transporte e na interpretação dos resultados. Um produto vendido com elevada quantidade de água contém menor massa efetiva de matéria seca por unidade comercial.

O teor de umidade deve ser medido por procedimento padronizado, com temperatura e tempo registrados. Resultados de composição devem ser apresentados preferencialmente em base seca, embora a umidade do produto comercial também precise ser informada.

A secagem em temperatura inadequada pode remover compostos além da água. Por isso, métodos desenvolvidos para solos, combustíveis ou alimentos não devem ser transferidos sem avaliação para todos os tipos de biocarvão.

6.5.2 Distribuição granulométrica

A granulometria influencia manuseio, dispersão, mistura, contato com o solo e formação de poeira. A análise pode ser realizada por peneiramento, utilizando uma sequência de aberturas conhecidas.

O resultado deve informar a proporção de massa presente em cada faixa. Apresentar somente o tamanho médio pode ocultar a presença de partículas muito finas ou muito grandes.

Produtos moídos depois da análise precisam ser novamente caracterizados se a granulometria final for importante para a aplicação.

6.5.3 Densidade aparente e densidade de partículas

A densidade aparente relaciona a massa seca com o volume ocupado pelo material, incluindo os espaços entre as partículas. Ela orienta transporte, dimensionamento de embalagens, armazenamento e cálculo de doses volumétricas.

A densidade de partículas desconsidera parte dos espaços existentes entre os fragmentos e necessita de métodos específicos. Os dois resultados não devem ser tratados como equivalentes.

A compactação durante o transporte pode alterar o volume aparente. O protocolo precisa especificar se o material foi acomodado livremente, submetido a vibração ou compactado.

6.5.4 Capacidade de retenção de água

A capacidade do biocarvão de reter água pode ser medida por diferentes procedimentos. Os resultados variam conforme granulometria, tempo de saturação, método de drenagem e pressão aplicada.

Por essa razão, um valor isolado de retenção de água não demonstra quanto estará disponível às plantas depois da incorporação ao solo. Essa resposta depende da interação entre biocarvão, textura, estrutura, dose e condições ambientais.

A caracterização do produto é útil para comparação, mas os efeitos agronômicos precisam ser medidos no sistema solo–planta, tema abordado no Capítulo 7.

6.6 Análise imediata e comportamento térmico

A análise imediata determina umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Esses parâmetros foram inicialmente utilizados para combustíveis sólidos, mas também ajudam a descrever a intensidade da conversão termoquímica.

O teor de materiais voláteis representa a fração liberada sob condições definidas de aquecimento. Ele não corresponde a uma única substância e depende rigorosamente da temperatura, da duração e da atmosfera do ensaio.

As cinzas representam a fração residual depois da oxidação da matéria orgânica. Seu teor pode variar de valores baixos em materiais lenhosos até concentrações elevadas em biocarvões produzidos de estercos, lodos ou resíduos ricos em minerais (Enders et al., 2012).

Em base seca, o carbono fixo é frequentemente calculado por diferença:

$$CF(\%)=100-MV-CZ$$

Em que (CF) representa carbono fixo, (MV) os materiais voláteis e (CZ) as cinzas.

O carbono fixo calculado não corresponde ao carbono elementar determinado por analisador. Ele é uma fração operacional definida pelo método de análise imediata. A terminologia precisa deixar essa diferença clara.

Aller, Bakshi e Laird (2017) demonstraram a necessidade de adaptar procedimentos de análise imediata às características dos biocarvões. Protocolos inadequados podem produzir resultados pouco comparáveis.

A análise termogravimétrica acompanha a variação de massa durante o aquecimento em atmosfera controlada. Ela permite observar perda de água, liberação de voláteis, oxidação e resistência térmica relativa. Entretanto, estabilidade térmica em laboratório não corresponde diretamente à persistência no solo.

6.7 Composição elementar

6.7.1 Carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre

A análise elementar fornece as concentrações de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. O oxigênio pode ser medido diretamente ou estimado por diferença.

A determinação por diferença acumula erros das demais análises. Umidade, cinzas e elementos não medidos podem interferir no cálculo. O relatório deve informar claramente se o oxigênio foi determinado ou estimado.

O carbono total pode incluir carbono orgânico e inorgânico. Biocarvões ricos em carbonatos podem apresentar parcela relevante de carbono inorgânico. Quando a estabilidade do carbono orgânico é o objetivo, essa distinção torna-se necessária.

Essas relações ajudam a descrever o grau de carbonização e a condensação das estruturas. Valores menores geralmente estão associados à transformação térmica mais intensa.

Os sistemas de qualidade utilizam especialmente a relação (H:C_org) como indicador de identidade e estabilidade. Entretanto, ela não deve ser interpretada como medida exata do tempo de permanência no ambiente.

6.7.2 Nitrogênio e enxofre

O nitrogênio total pode permanecer no sólido em diferentes estruturas orgânicas e inorgânicas. Sua presença não significa disponibilidade imediata às plantas.

O enxofre também pode ocorrer em formas com comportamentos diferentes. Matérias-primas contaminadas ou determinados resíduos industriais podem apresentar concentrações que exigem atenção.

As concentrações devem ser avaliadas juntamente com a origem da biomassa e a finalidade do produto.

6.8 pH, condutividade elétrica e potencial de neutralização

O pH é uma das determinações mais frequentes na caracterização do biocarvão. Entretanto, o resultado depende da relação entre massa de sólido e volume de solução, do tipo de solução, do tempo de equilíbrio e da forma de agitação.

Um valor de pH sem descrição do método possui comparabilidade limitada. Singh et al. (2017) demonstram que a padronização dessas condições é necessária para interpretar biocarvões de diferentes origens.

A condutividade elétrica estima a presença de sais solúveis. Produtos oriundos de estercos, lodos, resíduos alimentares ou biomassa exposta à água salina podem apresentar valores elevados.

A condutividade precisa ser interpretada de acordo com a cultura, o solo e a dose. Determinados sais fornecem nutrientes, enquanto concentrações excessivas podem prejudicar germinação e crescimento.

O pH não deve ser utilizado isoladamente para estimar a capacidade de corrigir a acidez do solo. O potencial de neutralização depende da quantidade e da reatividade de carbonatos, óxidos, hidróxidos e outros componentes alcalinos.

Dois produtos com pH semelhante podem apresentar capacidades neutralizantes muito diferentes. Quando a correção da acidez constitui finalidade principal, devem ser realizados ensaios específicos de neutralização.

6.9 Nutrientes, elementos minerais e metais

A análise elementar total pode incluir fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio, silício, ferro, manganês, cobre, zinco, boro e outros elementos.

A quantificação geralmente exige digestão ou solubilização da amostra seguida de análise por espectrometria. A elevada estabilidade química e a diversidade mineral dos biocarvões dificultam a digestão completa. Enders e Lehmann (2012) demonstraram que diferentes procedimentos de digestão podem produzir recuperações muito distintas.

O método precisa ser validado para a matriz analisada. Materiais de referência, amostras fortificadas, brancos e testes de recuperação ajudam a demonstrar que o procedimento foi adequado.

A concentração total não corresponde à disponibilidade agronômica. Um nutriente pode estar presente em fase mineral pouco solúvel, enquanto outro pode ser rapidamente liberado. Extrações em água, soluções salinas ou ácidos fracos fornecem informações operacionais, mas não reproduzem integralmente o comportamento no solo.

Metais potencialmente tóxicos também precisam ser determinados. Entre os elementos frequentemente avaliados estão arsênio, cádmio, chumbo, cromo, cobre, mercúrio, níquel e zinco. A lista e os limites dependem da matéria-prima, da finalidade e do sistema regulatório ou de certificação adotado.

A fluorescência de raios X portátil pode auxiliar na triagem de elementos em matérias-primas e produtos. Contudo, efeitos de matriz, umidade, granulometria e limites de detecção exigem calibração e validação. Resultados críticos devem ser confirmados por métodos laboratoriais adequados.

A microscopia eletrônica associada à espectroscopia de energia dispersiva pode mostrar a distribuição localizada de elementos. Todavia, essa análise é geralmente semiquantitativa e não substitui a determinação da concentração total do lote.

6.10 Porosidade, área superficial e morfologia

A estrutura porosa influencia adsorção, circulação de água e interação com substâncias. Sua caracterização pode incluir área superficial específica, volume de poros e distribuição de tamanhos.

A adsorção de gases é amplamente utilizada para medir área superficial. O método BET é frequente, mas sua aplicação requer cuidado. O gás escolhido, a temperatura de desgaseificação, a faixa de pressão e o modelo de cálculo modificam o resultado.

A classificação da IUPAC diferencia microporos, mesoporos e macroporos segundo suas dimensões. Entretanto, um único método de adsorção pode não representar adequadamente todas essas faixas (Thommes et al., 2015).

A desgaseificação em temperatura elevada pode modificar materiais pouco carbonizados. O protocolo precisa remover água e gases adsorvidos sem transformar a amostra.

Imagens de microscopia eletrônica ajudam a observar paredes celulares, fraturas e depósitos minerais. Contudo, uma imagem selecionada não quantifica a porosidade de todo o lote. Ela deve ser interpretada como evidência morfológica complementar.

Área superficial elevada não constitui indicador universal de qualidade. Ela pode ser importante em adsorção, mas não garante fertilidade, retenção de água disponível ou segurança.

6.11 Técnicas espectroscópicas e estruturais

Métodos avançados permitem investigar organização do carbono, grupos funcionais e fases minerais. Sua escolha deve ser orientada pela pergunta científica.

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier identifica grupos funcionais e ligações químicas. Os espectros ajudam a comparar matéria-prima e produto, embora sobreposição de bandas e presença mineral exijam interpretação cuidadosa.

A espectroscopia Raman fornece informações sobre organização e defeitos das estruturas carbonosas. A relação entre determinadas bandas é utilizada para comparar materiais, mas os resultados dependem do equipamento, do comprimento de onda e do tratamento dos dados.

A difração de raios X identifica fases cristalinas, especialmente minerais. Grande parte do carbono do biocarvão apresenta organização limitada e não produz picos equivalentes aos de materiais altamente cristalinos.

A ressonância magnética nuclear de estado sólido possibilita examinar os tipos de carbono presentes. Trata-se de técnica avançada, com maior custo e menor disponibilidade, indicada para questões estruturais específicas.

Espectroscopias de fotoelétrons excitados por raios X e de absorção de raios X fornecem informações sobre composição superficial e estados químicos. Essas análises são úteis em pesquisas avançadas e desenvolvimento de materiais, mas não integram necessariamente o controle rotineiro de todos os lotes.

A caracterização eficiente não é aquela que reúne o maior número de equipamentos. É aquela que seleciona métodos capazes de responder às perguntas relacionadas à identidade, à segurança e ao desempenho pretendido (Figura 30).

Figura 30 – Caracterização multitécnica e interpretação integrada das propriedades do biocarvão. *A caracterização combina determinações físicas, análise imediata e termogravimétrica, composição elementar, pH, condutividade elétrica, nutrientes, elementos potencialmente tóxicos, porosidade, morfologia e técnicas espectroscópicas ou estruturais. Cada método examina uma dimensão específica e possui limitações relacionadas à preparação da amostra, calibração, matriz e modelo de interpretação. Área superficial, teor de carbono, pH, imagem microscópica ou espectro isolado não definem universalmente a qualidade; os resultados precisam ser analisados em conjunto e relacionados à finalidade do produto.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Enders et al. (2012), Enders e Lehmann (2012), Thommes et al. (2015), Singh, Camps-Arbestain e Lehmann (2017), Weber e Quicker (2018) e nas seções 6.5 a 6.11.

6.12 Avaliação da estabilidade do carbono

A estabilidade representa a resistência do carbono à transformação e à mineralização. Nenhum ensaio isolado determina exatamente quanto tempo o biocarvão permanecerá no solo.

As relações (H:C_org) e (O:C_org) são utilizadas como indicadores do grau de carbonização. Spokas (2010) discutiu a relação entre composição elementar e persistência, destacando seu valor como ferramenta de classificação, mas também suas limitações.

Ensaios de oxidação química e térmica estimam frações mais ou menos resistentes. Cross e Sohi (2013) propuseram método de triagem da estabilidade relativa, enquanto Crombie et al. (2013) compararam diferentes indicadores e demonstraram sua relação com as condições de pirólise.

Incubações em solo permitem medir a liberação de dióxido de carbono ao longo do tempo. Esses estudos são mais próximos do ambiente, mas ainda dependem de temperatura, umidade, solo, atividade microbiana e duração do experimento.

Ensaios curtos precisam utilizar modelos para extrapolar o comportamento por períodos longos. Essa extrapolação contém incertezas e não deve ser apresentada como observação direta.

A estabilidade do produto também não corresponde automaticamente à remoção líquida de carbono. Projetos climáticos precisam considerar origem da biomassa, energia, transporte, emissões, permanência e destino final.

6.13 Contaminantes orgânicos

6.13.1 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos podem ser formados durante a conversão térmica e depositar-se na superfície do biocarvão. Sua concentração depende da matéria-prima, da temperatura, do tempo de residência dos vapores, do resfriamento e da eficiência de remoção dos condensados.

Hale et al. (2012) encontraram grande variação nas concentrações totais e disponíveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em diferentes biocarvões. Esse resultado demonstra que a denominação do processo não permite presumir segurança.

A concentração total é importante para controle de qualidade, mas não representa sozinha a exposição ambiental. Parte dos compostos pode permanecer fortemente retida, enquanto outra pode ser liberada. Mayer et al. (2016) discutem métodos para avaliar a exposição ambiental associada a esses contaminantes.

Os procedimentos de extração precisam ser claramente especificados. Solventes, tempo, temperatura e técnica podem produzir recuperações diferentes, dificultando comparações quando métodos distintos são utilizados.

6.13.2 Dioxinas, furanos e bifenilas policloradas

Dioxinas, furanos e bifenilas policloradas são contaminantes persistentes que podem exigir análise conforme matéria-prima, processo e finalidade.

O risco de formação de dioxinas está associado, entre outros fatores, à presença de cloro e às condições térmicas. A triagem rigorosa da matéria-prima reduz o risco, mas não substitui as análises quando o histórico indicar possibilidade de contaminação.

Madeira tratada, plásticos clorados e misturas urbanas não devem ser introduzidos em unidades destinadas a produzir biocarvão agrícola sem avaliação específica.

6.13.3 Compostos móveis e fitotóxicos

Biocarvões pouco carbonizados ou expostos aos próprios vapores podem reter ácidos, fenóis e outros compostos móveis. Essas substâncias podem inibir germinação e crescimento.

A lavagem ou o envelhecimento pode reduzir determinadas frações móveis, mas gera líquidos que precisam ser manejados. O tratamento posterior também modifica o produto e deve ser registrado.

6.14 Contaminantes físicos e biológicos

Fragmentos de plástico, vidro, metal, pedra e materiais não carbonizados comprometem a qualidade e podem produzir riscos durante a aplicação.

A inspeção visual e o peneiramento ajudam a identificar corpos estranhos, mas não detectam contaminantes dissolvidos ou partículas muito pequenas. A prevenção por separação na origem continua sendo a estratégia mais segura.

O tratamento térmico pode inativar organismos patogênicos, sementes e propágulos. Entretanto, a eficácia depende da temperatura realmente alcançada em todo o material e do tempo de exposição.

Além disso, o produto pode ser novamente contaminado durante resfriamento, armazenamento, transporte ou mistura. O controle sanitário não termina na saída do reator.

Produtos armazenados em locais úmidos podem desenvolver fungos ou receber contato de animais, águas residuárias e materiais contaminados. Embalagens, pisos e equipamentos precisam integrar o programa de higiene.

6.15 Ensaios biológicos e ecotoxicológicos

As análises químicas não identificam todas as possíveis interações biológicas. Ensaios de germinação e crescimento inicial oferecem triagem relativamente rápida de efeitos adversos.

Esses testes podem avaliar germinação, comprimento das raízes, crescimento da parte aérea e aparência das plântulas. Busch et al. (2012) demonstraram a utilidade de procedimentos simples para avaliar materiais carbonosos destinados ao solo.

O resultado depende da espécie utilizada, da concentração do extrato, da dose do material, do pH e da condutividade elétrica. Por isso, controle adequado e descrição do procedimento são indispensáveis.

Um efeito negativo na germinação pode resultar de salinidade, pH extremo, compostos orgânicos móveis ou outros fatores. O bioensaio identifica a resposta, mas análises complementares são necessárias para determinar a causa.

A ausência de fitotoxicidade em teste curto também não comprova segurança ambiental completa. Aplicações específicas podem exigir ensaios com microrganismos, minhocas, organismos aquáticos ou células, conforme as rotas de exposição.

Para hidrocarvões, a avaliação biológica merece atenção especial devido à presença potencial de compostos orgânicos móveis. Busch et al. (2013) observaram diferenças entre materiais frescos e tratados, reforçando que o pós-tratamento pode alterar a resposta biológica (Figura 31).

Figura 31 – Triagem de contaminantes e avaliação biológica da segurança do biocarvão. *A avaliação de segurança reúne informações sobre metais potencialmente tóxicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, contaminantes persistentes, sais, compostos orgânicos móveis, materiais estranhos e possíveis riscos biológicos. Ensaios de germinação, crescimento inicial, desenvolvimento radicular e outros testes ecotoxicológicos permitem detectar respostas que não são previstas apenas pela composição química. Um efeito adverso pode resultar de salinidade, pH extremo, compostos móveis ou outros fatores, enquanto a ausência de fitotoxicidade em ensaio curto não comprova segurança completa; bioensaios e análises químicas são evidências complementares.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Hale et al. (2012), Busch et al. (2012), Busch et al. (2013), Mayer et al. (2016) e nas seções 6.13 a 6.15.

6.16 Garantia e controle da qualidade analítica

A qualidade de um resultado depende de todo o processo: amostragem, preparação, calibração, medição, cálculo e relatório.

Um programa de garantia da qualidade deve incluir:

- Procedimentos operacionais escritos;
- Treinamento;
- Calibração dos equipamentos;
- Amostras em branco;
- Duplicatas;
- Materiais de referência;

- Amostras fortificadas;
- Testes de recuperação;
- Cartas de controle;
- Registro de manutenção;
- Rastreabilidade dos cálculos.

O limite de detecção indica a menor concentração que pode ser diferenciada do sinal de fundo. O limite de quantificação representa a concentração mínima que pode ser determinada com desempenho aceitável. Informar apenas "não detectado" sem apresentar o limite do método reduz o valor do resultado.

A incerteza analítica também precisa ser considerada, especialmente quando a concentração está próxima de um limite. Pequenas diferenças numéricas não devem ser tratadas automaticamente como diferenças reais.

Ensaios interlaboratoriais ajudam a avaliar comparabilidade. Bachmann et al. (2016) demonstraram que métodos distintos podem produzir variação significativa na análise de biocarvões, reforçando a necessidade de harmonização.

Laboratórios devem participar de programas de proficiência quando disponíveis. Quando não existirem materiais de referência específicos, controles internos e comparações entre laboratórios tornam-se ainda mais importantes.

6.17 Consistência entre lotes

A qualidade comercial exige que o produto mantenha características dentro das faixas declaradas. Uma análise isolada não demonstra consistência.

O acompanhamento deve comparar lotes ao longo do tempo. Gráficos de controle podem revelar tendências, mudanças graduais e desvios associados à matéria-prima ou ao processo.

Entre os parâmetros úteis para controle rotineiro estão:

- Umidade;
- Rendimento;
- Temperatura máxima;
- Materiais voláteis;
- Cinzas;
- pH;
- Condutividade elétrica;
- Carbono;
- Relação (H:C_org);

- Granulometria.

Parâmetros mais complexos e contaminantes podem ser analisados em periodicidade definida pelo risco, pelo padrão adotado e pelas alterações do processo.

Mašek et al. (2018) demonstraram que é possível produzir materiais consistentes em diferentes escalas quando o histórico térmico e as condições produtivas são controlados. A consistência, portanto, não depende apenas do porte, mas da capacidade de registrar e reproduzir o processo.

Quando um resultado fica fora da especificação, o lote precisa ser identificado e segregado. Misturá-lo com produto conforme para diluir o desvio não substitui a investigação da causa.

6.18 Qualidade orientada à finalidade

Não existe um único conjunto de propriedades ideal para todas as aplicações. O plano de caracterização deve ser construído a partir do uso pretendido.

Para aplicação agrícola geral, propriedades como pH, condutividade elétrica, nutrientes, estabilidade, granulometria e contaminantes são prioritárias. Para correção da acidez, deve ser incluído o potencial de neutralização. Para substratos de mudas, salinidade, retenção de água, granulometria e fitotoxicidade assumem maior importância.

Em sistemas de adsorção, área superficial, distribuição de poros, grupos funcionais e desempenho diante do contaminante precisam ser avaliados. Uma área superficial elevada não substitui ensaios de adsorção em condições representativas.

Para armazenamento de carbono, estabilidade, conteúdo de carbono orgânico, rendimento de carbono e avaliação da cadeia produtiva são essenciais.

Em materiais de construção, resistência, granulometria, interação com aglomerantes, lixiviação e estabilidade dimensional podem ser mais relevantes que propriedades agronômicas.

A especificação deve indicar faixas aceitáveis e métodos. Declarações vagas, como "rico em carbono", "alta porosidade" ou "melhora o solo", não constituem especificações técnicas.

6.19 Certificação e padrões de qualidade

A International Biochar Initiative publicou diretrizes para definição e análise do biocarvão destinado ao solo. O documento apresenta requisitos relacionados à matéria-prima, propriedades, contaminantes e métodos de ensaio (IBI, 2014).

O European Biochar Certificate incorpora exigências sobre biomassa, produção, rastreabilidade, lotes, análises, limites de contaminantes e classes de utilização. A versão 10.5E foi publicada em 2025 (EBC, 2025).

Os valores e procedimentos dependem da versão e da classe. Por essa razão, livros, artigos e relatórios devem informar explicitamente qual documento foi utilizado.

Realizar análises segundo determinado padrão não significa possuir sua certificação. A certificação depende de auditoria e atendimento ao conjunto de requisitos, não apenas do envio de uma amostra ao laboratório.

Esses sistemas internacionais servem como referências técnicas, mas não substituem a legislação aplicável no país onde o produto será fabricado e utilizado. Exigências podem variar conforme o produto seja comercializado como condicionador de solo, fertilizante, adsorvente, combustível, material industrial ou insumo para outra finalidade.

A certificação também não comprova eficácia em todas as condições. Ela oferece evidências de identidade, rastreabilidade e atendimento a requisitos de qualidade e segurança definidos para determinada classe.

6.20 Plano escalonado de caracterização

O quadro 6 organiza um plano de caracterização por finalidade. Ele não substitui normas ou exigências legais, mas ajuda a selecionar análises de forma progressiva.

Quadro 6 – Plano escalonado de caracterização do biocarvão

Nível	Finalidade	Informações e análises prioritárias	Decisão apoiada
1. Identidade e rastreabilidade	Demonstrar a origem e o histórico do produto	Matéria-prima, lote, processo, temperatura, tempo de residência, rendimento, resfriamento e armazenamento	Verificar se o material possui origem e produção conhecidas
2. Caracterização básica	Descrever as propriedades gerais	Umidade, granulometria, densidade aparente, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, pH e condutividade elétrica	Comparar lotes e orientar o manuseio e o uso preliminar
3. Composição e estabilidade	Avaliar o carbono e os componentes minerais	Carbono orgânico e total, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, enxofre, relações atômicas, nutrientes e estabilidade térmica ou química	Avaliar o grau de carbonização, os nutrientes e o potencial de permanência
4. Segurança ambiental	Identificar possíveis riscos	Metais potencialmente tóxicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, contaminantes persistentes, materiais estranhos e salinidade	Definir se o lote pode ser destinado à aplicação pretendida
5. Resposta biológica	Verificar efeitos não identificados apenas por	Germinação, crescimento inicial, fitotoxicidade e outros testes ecotoxicológicos, conforme o uso	Detectar efeitos adversos e selecionar doses para experimentos

	análises químicas		
6. Caracterização funcional	Demonstrar desempenho específico	Retenção de água, potencial de neutralização, capacidade de troca, porosidade, adsorção, resistência ou outras propriedades	Confirmar a adequação para aplicação agrícola, ambiental ou industrial
7. Controle contínuo	Manter a consistência comercial	Reanálise periódica, amostras de retenção, comparação entre lotes, auditorias e cartas de controle	Demonstrar a estabilidade do processo e das especificações

Fonte: Elaboração autoral com base em IBI (2014), Bachmann et al. (2016), Singh, Camps-Arbestain e Lehmann (2017) e EBC (2025)

6.21 Caracterização no contexto amazônico

A implantação de programas de qualidade na Amazônia precisa considerar distâncias, transporte, umidade, disponibilidade de laboratórios e diversidade de biomassas.

Amostras transportadas por longos períodos podem absorver umidade, sofrer fragmentação ou ser contaminadas. Embalagem, identificação e cadeia de custódia são particularmente importantes quando o envio depende de transporte fluvial e terrestre.

Nem todas as análises precisam ser realizadas localmente. Um sistema regional pode combinar testes básicos próximos à unidade produtiva com análises avançadas em laboratórios de referência.

Umidade, pH, condutividade, granulometria, densidade e determinados bioensaios podem ser realizados com infraestrutura relativamente acessível, desde que existam procedimentos, treinamento e controle. Análises de contaminantes orgânicos, composição elementar avançada e estrutura molecular geralmente exigem laboratórios especializados.

Equipamentos portáteis podem apoiar a triagem, mas precisam de calibração para as matrizes amazônicas. Caroços de açaí, resíduos de castanha-do-brasil, fibras, madeira e biomassas ricas em cinzas não apresentam comportamento instrumental idêntico.

A formação de uma coleção de materiais de referência regionais contribuiria para comparar laboratórios e validar métodos. Esses materiais poderiam representar cadeias importantes, desde que preparados, homogeneizados e caracterizados por ensaios interlaboratoriais.

Parcerias entre universidades, institutos de pesquisa, laboratórios públicos, cooperativas e empresas podem reduzir custos. O compartilhamento de protocolos e dados também evita que cada iniciativa repita isoladamente as mesmas etapas.

A simplificação não deve significar ausência de segurança. Pequenos produtores podem utilizar planos proporcionais à escala, mas produtos destinados ao solo precisam atender aos mesmos princípios de rastreabilidade, controle e proteção ambiental.

6.22 Dossiê técnico e comunicação do produto

Cada produto deve possuir um dossiê técnico que reúna informações essenciais. Esse documento pode incluir:

- Nome e código do produto;
- Fabricante e local de produção;
- Matéria-prima;
- Processo de conversão;
- Identificação do lote;
- Data de produção;
- Propriedades declaradas;
- Métodos analíticos;
- Resultados e unidades;
- Limites de detecção;
- Finalidade prevista;
- Restrições e precauções;
- Condições de armazenamento;
- Validade das análises;
- Certificações efetivamente obtidas.

O rótulo ou documento de entrega deve permitir acesso a essas informações, inclusive por código eletrônico quando apropriado.

A comunicação precisa separar resultados medidos de benefícios esperados. Informar que o produto apresenta determinado pH ou concentração de carbono é diferente de afirmar que aumentará a produtividade.

Declarações agronômicas devem ser apoiadas por ensaios compatíveis com o solo, a cultura e a dose. Alegações climáticas precisam considerar estabilidade e balanço de ciclo de vida.

Expressões como "100% sustentável", "livre de contaminantes" ou "serve para qualquer solo" devem ser evitadas. A ciência trabalha com limites analíticos, condições e incertezas, não com garantias absolutas.

6.23 Síntese do capítulo

A caracterização do biocarvão constitui uma cadeia de evidências formada por rastreabilidade, amostragem, preparação, análise, interpretação e tomada de decisão. A qualidade do resultado depende de todas essas etapas.

Propriedades físicas, análise imediata, composição elementar, pH, condutividade, nutrientes, porosidade e estabilidade descrevem diferentes dimensões do produto. Nenhum parâmetro isolado define sua qualidade.

A avaliação de segurança precisa considerar metais potencialmente tóxicos, contaminantes orgânicos, sais, materiais estranhos, patógenos e respostas biológicas. A ausência de um contaminante em determinada amostra não deve ser generalizada para outros lotes sem controle do processo.

A qualidade deve ser orientada pela finalidade. Produtos agrícolas, adsorventes, combustíveis e materiais industriais demandam especificações distintas. A certificação pode demonstrar atendimento a determinado sistema de requisitos, mas não substitui a legislação ou os ensaios de eficácia.

Na Amazônia, programas escalonados podem combinar análises locais de menor complexidade com laboratórios especializados. A cooperação institucional, a formação de materiais de referência e a adoção de protocolos comuns podem ampliar a confiabilidade sem tornar o controle inacessível.

Estabelecidas a identidade, a qualidade e a segurança do produto, torna-se possível investigar como ele interage com o solo e com as plantas. O próximo capítulo abordará as aplicações agrícolas do biocarvão em solos tropicais, examinando seus efeitos sobre acidez, nutrientes, água, estrutura, microbiota e produtividade, sempre considerando a interação entre produto, solo, cultura, dose e manejo.

Referências

ALLER, D.; BAKSHI, S.; LAIRD, D. A. Modified method for proximate analysis of biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 124, p. 335–342, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012.

BACHMANN, H. J. et al. Toward the standardization of biochar analysis: the COST Action TD1107 interlaboratory comparison. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 2, p. 513–527, 2016. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05055.

BILIAS, F. et al. Glossary of terms used in biochar research: IUPAC Technical Report. **Pure and Applied Chemistry**, v. 96, n. 11, p. 1541–1572, 2024. DOI: https://doi.org/10.1515/pac-2021-0106.

BUSCH, D.; KAMMANN, C.; GRÜNHAGE, L.; MÜLLER, C. Simple biotoxicity tests for evaluation of carbonaceous soil additives: establishment and reproducibility of four test procedures. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1023–1032, 2012. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2011.0122.

BUSCH, D.; STARK, A.; KAMMANN, C. I.; GLASER, B. Genotoxic and phytotoxic risk assessment of fresh and treated hydrochar from hydrothermal carbonization compared to biochar from pyrolysis. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 97, p. 59–66, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.07.003.

CAMPS-ARBESTAIN, M.; AMONETTE, J. E.; SINGH, B.; WANG, T.; SCHMIDT, H.-P. A biochar classification system and associated test methods. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. p. 165–194. DOI: https://doi.org/10.4324/9780203762264-8.

CROMBIE, K.; MAŠEK, O.; SOHI, S. P.; BROWNSORT, P.; CROSS, A. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 122–131, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12030.

CROSS, A.; SOHI, S. P. A method for screening the relative long-term stability of biochar. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 215–220, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12035.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644–653, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022.

ENDERS, A.; LEHMANN, J. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 7, p. 1042–1052, 2012. DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2012.656167.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE — EBC. **European Biochar Certificate: Guidelines for a Sustainable Production of Biochar**. Version 10.5E. Arbaz: Carbon Standards International, 2025. Disponível em: https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents. Acesso em: 17 set. 2026.

HALE, S. E. et al. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 5, p. 2830–2838, 2012. DOI: https://doi.org/10.1021/es203984k.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE — IBI. **Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil**. Version 2.0. 2014. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Standards_V2-0_final_2014.pdf. Acesso em: 17 set. 2026.

MAŠEK, O. et al. Consistency of biochar properties over time and production scales: a characterisation of standard materials. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 132, p. 200–210, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.020.

MAYER, P.; HILBER, I.; GOULIARMOU, V.; HALE, S. E.; CORNELISSEN, G.; BUCHELI, T. D. How to determine the environmental exposure of PAHs originating from biochar.

Environmental Science & Technology, v. 50, n. 4, p. 1941–1948, 2016. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05603.

SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (org.). **Biochar: A Guide to Analytical Methods**. Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. DOI: https://doi.org/10.1071/9781486305100.

SINGH, B.; DOLK, M. M.; SHEN, Q.; CAMPS-ARBESTAIN, M. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. In: SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. (org.). **Biochar: A Guide to Analytical Methods**. Clayton South: CSIRO Publishing, 2017. p. 23–38. DOI: https://doi.org/10.1071/9781486305100-ch03.

SPOKAS, K. A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O molar ratios. **Carbon Management**, v. 1, n. 2, p. 289–303, 2010. DOI: https://doi.org/10.4155/cmt.10.32.

THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution: IUPAC Technical Report. **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9–10, p. 1051–1069, 2015. DOI: https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240–261, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

CAPÍTULO 7

APLICAÇÕES AGRÍCOLAS DO BIOCARVÃO EM SOLOS TROPICAIS E AMAZÔNICOS

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Anne Cristina Barbosa Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Paulo Ricardo de Carvalho Esquerdo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Kalwan Maciel Martins de Jesus
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Luiz Eduardo Freitas da Silva Junior
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Thaysa Helena Alves Farias
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Arthur Masaaki Maeda Nagase
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Pedro Henrique Cardoso da Costa
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1294

Este capítulo examina as aplicações agrícolas do biocarvão em solos tropicais, relacionando as propriedades determinadas na caracterização do produto às respostas do sistema solo–planta. A correção da acidez, a retenção de nutrientes, a disponibilidade de água, a atividade biológica e a produtividade dependem da interação entre biocarvão, solo, cultura, clima e manejo. O objetivo não é recomendar uma dose ou um produto universal, mas apresentar critérios para selecionar, combinar, aplicar e avaliar o biocarvão em condições compatíveis com os sistemas produtivos amazônico.

7.1 Da caracterização à recomendação agronômica

A aplicação agrícola constitui uma das destinações mais estudadas para o biocarvão. Entretanto, a simples presença de carbono estável, poros ou cinzas não garante benefícios para o solo ou para as plantas. O desempenho agronômico depende da correspondência entre um problema diagnosticado e uma propriedade funcional efetivamente demonstrada.

Um biocarvão alcalino e com capacidade de neutralização comprovada, por exemplo, pode contribuir para o manejo da acidez. Um material com estrutura porosa e adequada molhabilidade pode modificar a retenção de água em determinados solos. Biocarvões enriquecidos em nutrientes podem atuar como fontes complementares, enquanto materiais com superfícies reativas podem interferir na retenção e na disponibilidade desses elementos. Essas funções não estão necessariamente presentes com a mesma intensidade em todos os produtos.

A recomendação deve começar com quatro perguntas:

1. Qual limitação do solo ou do sistema produtivo se pretende corrigir?
2. Quais propriedades do biocarvão são necessárias para enfrentar essa limitação?
3. Que riscos podem ser introduzidos pelo produto e pela dose escolhida?
4. Como o resultado será comparado com as práticas agronômicas já utilizadas?

Essa abordagem evita que o biocarvão seja aplicado apenas porque está disponível. Também impede que resultados obtidos com uma matéria-prima, uma condição de pirólise ou um tipo de solo sejam transferidos automaticamente para outro contexto. Como discutido no Capítulo 6, identidade, rastreabilidade, composição, estabilidade e segurança constituem condições anteriores à avaliação agronômica.

7.2 A heterogeneidade dos solos tropicais e amazônicos

A expressão "solo tropical" reúne ambientes muito diferentes. Embora extensas áreas tropicais apresentem solos intemperizados, ácidos e com baixa disponibilidade de alguns nutrientes, também existem solos jovens, férteis, arenosos, hidromórficos, aluviais, salinos ou influenciados

por materiais geológicos específicos. Na Amazônia, a diversidade pedológica acompanha variações de relevo, material de origem, drenagem, vegetação e história de uso.

O levantamento realizado por Quesada et al. demonstrou elevada variação nas propriedades físicas e químicas dos solos distribuídos pela Bacia Amazônica. Portanto, não é cientificamente adequado descrever toda a região como formada por solos uniformemente pobres ou igualmente responsivos ao biocarvão (Quesada et al., 2010).

Em solos muito intemperizados, a baixa saturação por bases, a acidez, a presença de alumínio trocável e a forte retenção de fósforo por óxidos de ferro e alumínio podem limitar a produção. Em solos arenosos, por outro lado, podem predominar a baixa retenção de água, a pequena capacidade de troca de cátions e as perdas de nutrientes. Áreas de várzea apresentam regimes de inundação, fertilidade e processos biogeoquímicos distintos daqueles observados em terras firmes.

O histórico de uso também modifica a resposta. Um solo degradado, compactado ou com baixa matéria orgânica pode responder de forma diferente de uma área manejada com adubação, correção da acidez e cobertura permanente. Assim, a classe de solo, isoladamente, não determina a recomendação. É necessário considerar:

- Textura e mineralogia;
- Densidade e estrutura;
- pH e acidez potencial;
- Alumínio e saturação por bases;
- Capacidade de troca de cátions;
- Teores de matéria orgânica;
- Disponibilidade de macro e micronutrientes;
- Regime de umidade e drenagem;
- Cultura e sistema de manejo;
- Histórico de calagem, adubação e uso do solo.

Essa heterogeneidade ajuda a explicar por que o mesmo biocarvão pode aumentar a produtividade em uma área, não produzir efeito mensurável em outra e causar desequilíbrios quando aplicado sem diagnóstico.

7.3 O biocarvão no sistema solo–planta

A resposta agronômica resulta de processos físicos, químicos e biológicos interdependentes. O biocarvão pode modificar o ambiente onde as raízes crescem, os nutrientes

circulam e os microrganismos atuam. Entretanto, essas modificações não ocorrem simultaneamente nem possuem a mesma intensidade.

Joseph et al. propõem que a interação do biocarvão com o solo evolui ao longo do tempo. Nas primeiras semanas, podem predominar a dissolução de componentes solúveis e a liberação de substâncias presentes nas cinzas ou nos poros. Nos meses seguintes, a oxidação das superfícies e as interações com minerais, matéria orgânica e microrganismos alteram sua reatividade. Posteriormente, o envelhecimento produz revestimentos e associações organominerais capazes de modificar a retenção de água e nutrientes (Joseph et al., 2021).

Por esse motivo, a ausência de resposta na primeira safra não significa necessariamente ausência de efeitos posteriores. Da mesma forma, um aumento inicial de produtividade provocado pela liberação de nutrientes solúveis não demonstra que o benefício será mantido por vários ciclos.

A cadeia causal esperada deve ser explicitada antes da aplicação. Por exemplo:

biocarvão com alcalinidade comprovada → aumento do pH → redução do alumínio trocável → maior crescimento radicular → aumento da absorção de nutrientes → resposta produtiva.

Em outro contexto, a sequência poderia ser:

biocarvão poroso e hidrofílico → alteração da distribuição de poros → maior disponibilidade de água → menor estresse hídrico → manutenção da atividade fotossintética → maior estabilidade da produção.

Se as propriedades iniciais, os processos intermediários e a resposta final não forem medidos, torna-se difícil atribuir os resultados ao mecanismo proposto (Figura 32).

Figura 32 – Correspondência entre diagnóstico do solo, propriedades do biocarvão e resposta agronômica. *A recomendação agrícola deve relacionar a limitação diagnosticada às propriedades funcionais comprovadas do produto. Em solo tropical ácido e argiloso, a resposta pode depender da alcalinidade e da capacidade de neutralização; em solo arenoso, da porosidade, da molhabilidade e da retenção de água ou nutrientes. Em solo fértil e sem limitação identificada, a aplicação pode não produzir vantagem mensurável e ainda introduzir desequilíbrios. A comparação deve integrar caracterização do lote, propriedades do solo, mecanismos intermediários e resposta da cultura, evitando recomendações universais.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Quesada et al. (2010), Joseph et al. (2021), Schmidt et al. (2021) e nas seções 7.1 a 7.3.

7.4 Acidez do solo, alumínio e efeito corretivo

A acidez é uma limitação frequente em áreas agrícolas tropicais. Valores baixos de pH podem estar associados a pequenas quantidades de cálcio e magnésio trocáveis, maior solubilidade do alumínio e redução da disponibilidade de alguns nutrientes. Nessas condições, determinados biocarvões podem exercer efeito corretivo.

A alcalinidade do produto resulta principalmente de carbonatos, óxidos, hidróxidos, sais alcalinos e grupos funcionais superficiais. Sua magnitude depende da matéria-prima e da temperatura de produção. Biocarvões provenientes de resíduos com elevada concentração mineral tendem a apresentar maior teor de cinzas e maior potencial de neutralização do que materiais lenhosos pobres em minerais. Entretanto, também podem apresentar maior condutividade elétrica ou concentração de determinados elementos.

Yuan e Xu demonstraram que a forma e a quantidade dos componentes alcalinos influenciam o efeito de biocarvões sobre solos ácidos. O pH do produto, isoladamente, não representa toda a sua capacidade de neutralização (Yuan; Xu, 2011). Por essa razão, a escolha deve considerar a alcalinidade ou o poder de neutralização medido, e não apenas o pH obtido em suspensão aquosa.

O aumento do pH pode reduzir a atividade do alumínio na solução e favorecer o crescimento das raízes. Em experimento conduzido em solo altamente intemperizado da Amazônia Central, Steiner et al. observaram redução do alumínio trocável e melhor desempenho produtivo

quando o material carbonizado foi associado à fertilização mineral (Steiner et al., 2007). Em um Latossolo da savana colombiana, Major et al. também observaram aumento do pH, redução da acidez e maior disponibilidade de cálcio e magnésio após a aplicação de biocarvão (Major et al., 2010).

Esses resultados não autorizam a substituição automática do calcário pelo biocarvão. O calcário possui parâmetros agronômicos e métodos de recomendação consolidados, enquanto os biocarvões apresentam maior heterogeneidade. Além disso, um produto alcalino pode fornecer potássio e sódio, mas não necessariamente as quantidades de cálcio e magnésio necessárias à cultura.

A aplicação excessiva pode elevar o pH além da faixa adequada, reduzir a disponibilidade de micronutrientes e provocar desequilíbrios nutricionais. A comparação com a calagem convencional deve considerar:

- Necessidade de correção calculada para o solo;
- Capacidade de neutralização do biocarvão;
- Velocidade de reação;
- Teores de cálcio e magnésio;
- Concentração de sais;
- Custo por unidade de acidez neutralizada;
- Efeito residual;
- Resposta da cultura.

O biocarvão deve ser tratado como corretivo somente quando essa função estiver analiticamente demonstrada.

7.5 Capacidade de troca e retenção de nutrientes

A capacidade de troca de cátions representa a aptidão do solo para reter íons positivamente carregados, como cálcio, magnésio, potássio e amônio. Em solos de baixa atividade da fração argila e reduzido teor de matéria orgânica, o aumento das cargas superficiais pode contribuir para diminuir perdas e melhorar o aproveitamento de nutrientes.

As superfícies do biocarvão apresentam grupos funcionais cuja quantidade e natureza dependem da matéria-prima, da pirólise e do envelhecimento. Alguns produtos recém-produzidos apresentam capacidade de troca relativamente pequena, que aumenta à medida que suas superfícies são oxidadas no solo. Liang et al. relacionaram a elevada capacidade de troca observada em solos com carbono pirogênico da Amazônia à oxidação superficial e à alta densidade de cargas por unidade de área (Liang et al., 2006).

Entretanto, maior capacidade de retenção não significa necessariamente maior disponibilidade para as plantas. O nutriente precisa ser retido de forma reversível e liberado em sincronia com a demanda da cultura. Uma ligação muito forte pode reduzir sua disponibilidade; uma ligação muito fraca pode não impedir a lixiviação.

O efeito também depende do solo. Em materiais argilosos que já apresentam elevada retenção, a contribuição adicional pode ser pequena. Em solos arenosos, a incorporação de um material com cargas superficiais adequadas pode produzir alteração proporcionalmente maior, embora a quantidade necessária para modificar toda a camada cultivada possa ser elevada.

Estudo de campo em um Latossolo colombiano mostrou que os efeitos sobre a lixiviação não foram uniformes para todos os elementos. Isso reforça que o biocarvão não funciona como uma barreira genérica capaz de reter qualquer nutriente (Major et al., 2012).

7.6 Nitrogênio: retenção, disponibilidade e fertilização

O nitrogênio merece atenção porque muitos biocarvões, principalmente os produzidos com biomassa lenhosa, contêm pouca quantidade desse nutriente em formas prontamente disponíveis. Mesmo quando a análise elementar indica concentração significativa de nitrogênio total, parte dele pode estar integrada a estruturas resistentes e não atuar como fertilizante no curto prazo.

A aplicação de um biocarvão pobre em nitrogênio não elimina a necessidade de adubação nitrogenada. Em determinadas condições, o produto pode contribuir para reter amônio ou nitrato, modificar a mineralização da matéria orgânica e influenciar as perdas por lixiviação ou processos gasosos. No entanto, a direção e a magnitude dessas respostas variam.

A retenção de amônio pode ocorrer por troca catiônica. A retenção de nitrato é mais complexa, pois muitas superfícies do biocarvão apresentam carga negativa. O envelhecimento, a presença de minerais e a formação de revestimentos orgânicos podem criar mecanismos adicionais de retenção. Estudos com biocarvões cocompostados identificaram superfícies enriquecidas em compostos orgânicos e nutrientes, capazes de modificar a captura e a liberação de nitrogênio (Hagemann et al., 2017).

Em vez de reduzir previamente a dose de nitrogênio com base em uma expectativa teórica de maior eficiência, é mais seguro comparar tratamentos e acompanhar:

- Nitrogênio mineral no solo;
- Estado nutricional das plantas;
- Produtividade;
- Recuperação aparente do fertilizante;

- Perdas por lixiviação, quando possível;
- Resposta ao longo de mais de um ciclo.

A inoculação de leguminosas também pode interagir com o biocarvão. Rondon et al. observaram aumento da fixação biológica de nitrogênio em feijoeiro sob condições experimentais específicas, associado a mudanças na disponibilidade de nutrientes e no ambiente químico do solo (Rondon et al., 2007). Esse resultado não deve ser generalizado para todas as leguminosas ou produtos, pois a nodulação também depende de estirpe, acidez, molibdênio, fósforo, umidade e manejo da cultura.

7.7 Fósforo, potássio, cálcio e outros nutrientes

O efeito do biocarvão sobre o fósforo pode envolver fornecimento direto, alteração do pH, competição por sítios de adsorção, complexação de ferro e alumínio ou precipitação com cálcio. Como esses mecanismos podem atuar em direções opostas, o resultado precisa ser avaliado para cada combinação entre produto e solo.

Biocarvões produzidos de materiais ricos em cinzas podem conter fósforo, potássio, cálcio e magnésio. A concentração total, porém, não representa necessariamente a fração disponível durante o ciclo da cultura. A especiação mineral, a solubilidade e o pH determinam a liberação.

O potássio presente nas cinzas de resíduos vegetais pode ser relativamente solúvel. Isso pode produzir resposta inicial positiva em solos deficientes, mas também elevar a condutividade elétrica quando a dose é excessiva. Biocarvões provenientes de estercos ou outros materiais ricos em minerais exigem atenção adicional à salinidade, ao sódio e ao balanço entre nutrientes.

Cálcio e magnésio podem participar do efeito corretivo e nutricional. No estudo de Major et al., o aumento da disponibilidade desses elementos ajudou a explicar a resposta tardia da cultura do milho (Major et al., 2010). Entretanto, a composição mineral muda substancialmente entre matérias-primas.

A disponibilidade de micronutrientes também pode ser alterada. O aumento do pH tende a reduzir a solubilidade de alguns metais, o que pode ser desejável em solos contaminados, mas indesejável quando induz deficiência de ferro, manganês, zinco ou cobre. Por essa razão, a análise de tecido vegetal complementa a análise do solo.

7.8 Propriedades físicas, água e crescimento radicular

A baixa densidade e a estrutura porosa do biocarvão podem modificar a densidade aparente, a porosidade, a agregação e a distribuição de água no solo. Os efeitos dependem do tamanho das

partículas, da porosidade interna, da molhabilidade, da dose, do modo de incorporação e da textura do solo.

Revisões e meta-análises indicam, em média, redução da densidade aparente e aumento da porosidade e da retenção de água. Contudo, a amplitude dos resultados é elevada, e as respostas tendem a ser mais evidentes em solos de textura grossa ou quando são utilizadas doses relativamente altas (Omondi et al., 2016; Blanco-Canqui, 2017).

A retenção total de água não deve ser confundida com água disponível. Parte da água pode permanecer retida em poros muito pequenos e não ser acessível às plantas. Por isso, a avaliação agronômica deve considerar a diferença entre o conteúdo de água próximo à capacidade de campo e o ponto de murcha, além da condutividade hidráulica e da infiltração.

Uma meta-análise específica mostrou que os efeitos sobre as propriedades hídricas variam com textura, matéria-prima, temperatura de produção, dose e duração do experimento (Edeh; Mašek; Buss, 2020). Em solos arenosos, partículas finas podem ocupar poros maiores, alterar a condutividade e aumentar a retenção. Em solos argilosos, os efeitos podem ocorrer por mudanças na agregação ou na conectividade dos poros.

Biocarvões hidrofóbicos podem inicialmente dificultar a infiltração ou apresentar molhamento desigual. A caracterização da molhabilidade e o umedecimento antes da aplicação ajudam a reduzir esse risco. Também é necessário considerar que o efeito observado em vasos, onde a proporção de biocarvão pode ser elevada e o volume de solo é limitado, nem sempre será reproduzido em campo.

Na Amazônia, a contribuição para o manejo da água pode ser relevante tanto em solos arenosos quanto em áreas sujeitas a veranicos. Entretanto, a elevada precipitação de parte da região também torna importante avaliar drenagem, aeração e lixiviação. "Maior retenção" não é sempre sinônimo de "melhor condição hídrica".

7.9 Atividade biológica e rizosfera

O biocarvão pode modificar o habitat dos organismos do solo por meio de mudanças no pH, na umidade, na disponibilidade de nutrientes, na aeração e na oferta de superfícies para colonização. Seus poros podem oferecer microambientes parcialmente protegidos, mas a presença física dos poros não garante colonização benéfica.

A revisão de Lehmann et al. mostrou que as respostas biológicas incluem alterações na biomassa, atividade e composição das comunidades, mas também evidenciou grande variabilidade entre estudos (Lehmann et al., 2011). Essas respostas podem resultar tanto de efeitos diretos do material quanto de mudanças químicas no solo.

O biocarvão não deve ser tratado automaticamente como inoculante microbiano. Um produto pirolisado adequadamente possui baixa carga de organismos vivos no momento da produção. A colonização ocorre posteriormente, a partir do solo, do composto, dos inoculantes ou de outros materiais adicionados.

A associação com compostos orgânicos pode acelerar a formação de revestimentos superficiais e favorecer a ocupação dos poros. Ainda assim, aumentos de respiração ou atividade enzimática não demonstram, isoladamente, melhoria da qualidade do solo. A interpretação deve relacionar indicadores biológicos à ciclagem de nutrientes, ao crescimento radicular, à sanidade e à produtividade.

Também podem ocorrer efeitos indesejáveis. Compostos orgânicos condensáveis, salinidade elevada, pH inadequado ou contaminantes podem inibir germinação e atividade biológica. Os bioensaios discutidos no Capítulo 6 devem anteceder aplicações em maior escala (Figura 33).

Figura 33 – Mecanismos físicos, químicos e biológicos do biocarvão no sistema solo–planta. *O corte compara a mesma cultura em um solo tropical sem tratamento e em uma zona radicular que recebeu biocarvão caracterizado e compatível com a limitação existente. A incorporação pode modificar a acidez, a distribuição de poros, a água disponível, a retenção reversível de nutrientes e a formação de interfaces organominerais colonizadas por microrganismos. Esses processos podem favorecer o aprofundamento e a ramificação das raízes, mas sua magnitude depende da matéria-prima, da pirólise, da dose, da textura do solo, do envelhecimento e do manejo. A presença de poros ou microrganismos, isoladamente, não comprova benefício agronômico.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Liang et al. (2006), Lehmann et al. (2011), Major et al. (2012), Blanco-Canqui (2017), Edeh, Mašek e Buss (2020), Joseph et al. (2021) e nas seções 7.4 a 7.9.

7.10 Resposta das culturas e produtividade

As sínteses globais indicam efeito agronômico médio positivo, mas a média não constitui garantia de resposta local. Uma revisão sistemática de 26 meta-análises encontrou efeitos gerais

favoráveis sobre diversos atributos do solo e das culturas, ao mesmo tempo que destacou a heterogeneidade dos produtos, das doses e dos experimentos (Schmidt et al., 2021).

Jeffery et al. observaram aumento médio de aproximadamente 25% na produtividade em estudos tropicais, enquanto a resposta agregada em regiões temperadas não foi significativa. Nos trópicos, os efeitos foram associados principalmente à correção da acidez e ao fornecimento de nutrientes em solos com limitações químicas (Jeffery et al., 2017). Esse valor não deve ser usado como previsão para uma propriedade, pois reúne culturas, solos, produtos e condições experimentais distintas.

A resposta tende a ser mais provável quando existe uma limitação que o biocarvão consegue modificar. Em um solo fértil, corrigido e com boa disponibilidade de água, pode haver pouco espaço para aumento produtivo. Em contrapartida, um solo ácido, arenoso ou com pequena capacidade de retenção pode apresentar maior potencial de resposta, desde que o produto possua as propriedades necessárias.

Resultados de longo prazo também mostram que a resposta pode ser gradual. No experimento conduzido por Major et al. em Latossolo colombiano, não houve aumento significativo da produção de milho no primeiro ano, mas ocorreram respostas nos ciclos seguintes. Os autores relacionaram esse resultado ao aumento do pH e da disponibilidade de cálcio e magnésio (Major et al., 2010).

Em experimento na Amazônia Central, o material carbonizado apresentou maior efeito quando associado à adubação mineral. A combinação superou a fertilização isolada em determinadas condições, evidenciando que o produto atuou como componente de um sistema de manejo e não como substituto completo dos nutrientes exigidos pela cultura (Steiner et al., 2007).

Portanto, produtividade deve ser interpretada juntamente com:

- Fertilidade inicial;
- Disponibilidade de água;
- Pressão de pragas, doenças e plantas daninhas;
- Variedade ou cultivar;
- Dose e método de aplicação;
- Qualidade do biocarvão;
- Fertilização associada;
- Duração do experimento;
- Condições meteorológicas;
- Viabilidade econômica.

7.11 Interação com calagem e gessagem

Biocarvão, calcário e gesso possuem funções parcialmente diferentes. O calcário neutraliza a acidez e fornece cálcio e, conforme sua composição, magnésio. O gesso fornece cálcio e enxofre e pode favorecer o ambiente radicular em subsuperfície, mas não substitui a calagem na correção do pH da camada superficial. O biocarvão apresenta composição mais variável e pode reunir efeitos corretivos, físicos e de retenção.

Quando o objetivo é avaliar sua capacidade de substituir parte da calagem, o experimento deve comparar doses equivalentes em capacidade de neutralização, e não apenas massas iguais. Comparar uma tonelada de biocarvão com uma tonelada de calcário pode produzir uma conclusão enganosa, pois os dois materiais podem possuir poderes de neutralização muito diferentes.

A aplicação conjunta pode ser pertinente quando o calcário realiza a correção principal e o biocarvão acrescenta carbono estável ou modifica outras propriedades. No entanto, a soma das alcalinidades precisa ser considerada para evitar pH excessivo.

Em áreas onde a acidez subsuperficial restringe o crescimento radicular, a localização e a mobilidade dos componentes também são importantes. A maior parte do biocarvão permanece próxima ao local de incorporação. Portanto, não se deve presumir que uma aplicação superficial modificará rapidamente as camadas mais profundas.

7.12 Interação com fertilizantes minerais

O biocarvão não contém, necessariamente, nutrientes em quantidade e proporção suficientes para atender às exigências das culturas. Por isso, sua integração à fertilização mineral é uma das estratégias mais relevantes.

Meta-análise de Ye et al. verificou que a aplicação de biocarvão isoladamente não apresentou aumento médio consistente de produtividade nos controles considerados. Quando combinado com fertilizante inorgânico, o tratamento apresentou produtividade média superior à fertilização isolada, embora as respostas variassem entre os estudos (Ye et al., 2020).

O possível ganho de eficiência pode decorrer de:

- Maior retenção de nutrientes;
- Redução da acidez;
- Melhoria do crescimento radicular;
- Alteração da disponibilidade de água;
- Fornecimento de elementos presentes nas cinzas;
- Interação entre fertilizante e superfícies envelhecidas.

Esses mecanismos não autorizam uma redução automática das doses recomendadas. A substituição parcial deve ser avaliada experimentalmente, com tratamentos que permitam separar os efeitos. Um delineamento básico pode incluir:

- Controle sem biocarvão e sem fertilização;
- Fertilização recomendada;
- Biocarvão sem fertilização;
- Biocarvão associado à fertilização;
- Doses reduzidas de fertilizante com biocarvão, quando justificadas.

Fertilizantes formulados com biocarvão representam outra possibilidade. Meta-análise de Melo et al. indicou potencial de aumento da produtividade em comparação com fertilizantes convencionais em determinados contextos, mas o resultado depende da formulação, da proporção de carbono, do processo de enriquecimento e da compatibilidade entre produto, solo e cultura (Melo et al., 2022).

7.13 Composto, esterco e condicionamento do biocarvão

A combinação com composto, esterco ou outros materiais orgânicos pode ser mais eficiente do que a aplicação do biocarvão fresco. O material orgânico fornece nutrientes e carbono biodegradável, enquanto o biocarvão pode oferecer superfícies, poros e maior estabilidade.

Durante a cocompostagem, o biocarvão participa de processos de adsorção, oxidação superficial e formação de revestimentos orgânicos. Kammann et al. relacionaram o melhor crescimento vegetal promovido por biocarvão cocompostado à captura e à liberação gradual de nitrato (Kammann et al., 2015). Hagemann et al. identificaram revestimentos orgânicos ricos em nutrientes sobre as superfícies internas e externas do material cocompostado (Hagemann et al., 2017).

Em um Ferralsol tropical na Austrália, Agegnehu et al. observaram melhoria de atributos do solo e da produção de amendoim com combinações de biocarvão e composto, embora os tratamentos também tenham produzido respostas distintas quanto às emissões e à disponibilidade de nutrientes (Agegnehu et al., 2015).

O chamado "carregamento" do biocarvão consiste em colocá-lo em contato com uma fonte de nutrientes antes da aplicação. Essa prática pode incluir mistura com composto maturado, esterco tratado, solução fertilizante ou outro insumo permitido. Contudo, o processo deve ser controlado. A utilização de resíduos não estabilizados pode introduzir patógenos, sais ou contaminantes.

A cocompostagem também não deve ser confundida com a simples mistura realizada imediatamente antes da aplicação. Os dois procedimentos podem ser úteis, mas produzem superfícies e interações diferentes (Figura 34).

Figura 34 – Condicionamento e cocompostagem do biocarvão antes da aplicação agrícola. *O condicionamento controlado pode envolver peneiramento, umedecimento e contato do biocarvão com composto maturado, esterco tratado ou solução fertilizante. Na cocompostagem, a mistura permanece submetida a aeração, controle de umidade, temperatura e maturação, favorecendo a oxidação superficial e a formação de revestimentos orgânicos ricos em nutrientes. O produto estabilizado pode apresentar interação mais gradual com o solo e as raízes do que o material fresco. A cocompostagem não equivale à simples mistura imediatamente antes da aplicação e não elimina a necessidade de avaliar salinidade, estabilidade, fitotoxicidade, sanidade e contaminantes.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Kammann et al. (2015), Agegnehu et al. (2015), Hagemann et al. (2017), Ye et al. (2020) e nas seções 7.12 e 7.13.

7.14 Formas de aplicação no campo

A forma de aplicação influencia a dose efetiva, o contato com o solo, a exposição das raízes e o custo operacional. As principais estratégias incluem aplicação em área total, incorporação localizada, deposição superficial e utilização em covas, sulcos ou substratos.

7.14.1 Aplicação em área total

A distribuição em toda a superfície seguida de incorporação busca modificar a camada cultivada de maneira relativamente uniforme. Essa estratégia requer grande quantidade de material e equipamentos adequados. A baixa densidade pode aumentar os custos de transporte e dificultar a distribuição.

Partículas secas e finas estão sujeitas à deriva pelo vento. O umedecimento controlado, a granulação ou a mistura com composto podem reduzir perdas e exposição dos trabalhadores à poeira.

7.14.2 Aplicação localizada

A aplicação em sulcos, linhas, faixas ou covas concentra o produto na região explorada pelas raízes. Essa estratégia reduz a massa necessária por hectare e pode ser adequada a cultivos perenes, sistemas agroflorestais, hortaliças e unidades familiares.

Entretanto, a concentração localizada aumenta o risco de salinidade, alcalinidade excessiva ou contato com compostos fitotóxicos. A dose por cova ou metro de sulco precisa ser convertida em concentração no volume de solo efetivamente tratado.

7.14.3 Aplicação superficial

Em sistemas que evitam o revolvimento, o biocarvão pode ser aplicado na superfície ou combinado com cobertura orgânica. A incorporação biológica e física tende a ser lenta. A erosão, o escoamento e o transporte pelo vento devem ser avaliados, especialmente em áreas inclinadas.

7.14.4 Substratos e viveiros

A utilização em substratos permite maior controle da proporção adicionada e das condições de cultivo. Mesmo assim, resultados obtidos em recipientes não devem ser transferidos diretamente para o campo. Proporções volumétricas elevadas podem alterar a aeração, a retenção de água, o pH e a condutividade elétrica.

Em viveiros, o biocarvão deve ser comparado com os componentes convencionais do substrato e avaliado quanto à emergência, crescimento, arquitetura radicular, retenção de água, estabilidade física e nutrição das mudas.

7.15 Definição da dose

Não existe dose universal de biocarvão. A quantidade deve ser definida a partir do objetivo agronômico, das propriedades do produto, da massa de solo tratada, da forma de aplicação, do custo e do risco.

A massa necessária para uma área pode ser calculada por:

$$MB = DB \setminus A$$

em que:

- (MB) é a massa de biocarvão;
- (DB) é a dose por unidade de área;
- (A) é a área tratada.

Doses elevadas podem produzir alterações mensuráveis, mas exigem maior volume de biomassa, transporte e trabalho. Doses menores e localizadas podem ser economicamente mais acessíveis, principalmente quando o biocarvão é enriquecido ou associado a composto e fertilizantes.

A definição deve começar com ensaios de incubação, vasos ou parcelas pequenas, utilizando uma faixa de doses. A ampliação deve ocorrer somente depois da avaliação dos resultados agronômicos, ambientais e econômicos.

7.16 Aplicações em diferentes sistemas produtivos

7.16.1 Culturas anuais

Em culturas anuais, a aplicação pode ser realizada em área total ou na linha de plantio. O curto ciclo facilita a medição da produtividade, mas pode não capturar efeitos que surgem após o envelhecimento do material. Avaliações por várias safras são necessárias para estimar o efeito residual.

7.16.2 Cultivos perenes

Em fruticultura, sistemas agroflorestais e outras culturas perenes, a aplicação localizada pode reduzir custos e direcionar o produto ao volume de solo explorado pelas raízes. Deve-se evitar concentrações excessivas na cova, sobretudo com materiais ricos em cinzas.

Como o sistema permanece por vários anos, é importante avaliar crescimento, nutrição, produção, qualidade dos frutos e mudanças graduais no solo.

7.16.3 Hortaliças

A elevada demanda nutricional e o ciclo curto tornam as hortaliças sensíveis à salinidade, ao pH e à disponibilidade imediata de nutrientes. Biocarvões cocompostados ou previamente enriquecidos podem ser mais adequados do que materiais frescos, mas precisam ser comparados com a adubação e os substratos normalmente utilizados.

7.16.4 Sistemas agroflorestais

Os sistemas agroflorestais apresentam diversidade de espécies, profundidades radiculares e formas de manejo. O biocarvão pode ser incorporado em faixas, berços de plantio ou zonas de

maior deposição de resíduos orgânicos. Entretanto, a resposta de uma espécie não representa necessariamente o desempenho de todo o sistema.

A presença histórica de carbono pirogênico nas Terras Pretas de Índio demonstra que materiais carbonizados podem participar da formação de solos férteis e persistentes. Essas áreas, porém, resultam de processos prolongados envolvendo resíduos orgânicos, nutrientes, ocupação humana e manejo. Elas não constituem uma receita reproduzível pela aplicação isolada de biocarvão.

7.16.5 Recuperação produtiva de áreas degradadas

O biocarvão pode integrar estratégias de recuperação quando a degradação envolve perda de matéria orgânica, pequena retenção de nutrientes ou limitações físicas. Contudo, não corrige sozinho compactação severa, erosão ativa, contaminação, drenagem inadequada ou ausência de cobertura vegetal.

A recuperação exige combinar controle da erosão, revegetação, correção química, aporte de nutrientes, matéria orgânica e manejo da água. O biocarvão deve possuir uma função definida dentro desse conjunto (Figura 35).

Figura 35 – Estratégias de aplicação do biocarvão em diferentes sistemas produtivos tropicais. *A aplicação pode ser distribuída em área total ou concentrada em linhas de culturas anuais, covas e faixas de cultivos perenes, canteiros, substratos de viveiro e núcleos de recuperação produtiva. A localização modifica a concentração efetiva do produto no volume de solo tratado, o contato com as raízes, a quantidade necessária por hectare e o custo operacional. Materiais secos e finos devem ser umedecidos, granulados ou misturados a composto para reduzir deriva e exposição. Em áreas degradadas, o biocarvão constitui apenas um componente, devendo ser associado à cobertura do solo, controle da erosão, correção química, nutrientes e manejo da água.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Omondi et al. (2016), Blanco-Canqui (2017), Schmidt et al. (2021) e nas seções 7.14 a 7.16.

7.17 Situações de baixa resposta ou efeitos adversos

A ausência de resposta não significa necessariamente que o produto esteja fora de especificação. Pode indicar que a propriedade modificada não era limitante. Um biocarvão destinado a elevar o pH dificilmente aumentará a produtividade em um solo que já se encontra na faixa adequada e possui fertilidade equilibrada.

Entre as causas frequentes de baixa resposta estão:

- Uso de produto incompatível com a limitação do solo;
- Aplicação de dose insuficiente para modificar o volume tratado;
- Ausência de nutrientes exigidos pela cultura;
- Solo já corrigido e fértil;
- Deficiência hídrica ou encharcamento não resolvidos;
- Tempo insuficiente para o envelhecimento das superfícies;
- Distribuição irregular;
- Limitação da cultura por pragas, doenças ou clima;
- Elevada variabilidade experimental.

Efeitos adversos podem decorrer de:

- Excesso de sais;
- Elevação excessiva do pH;
- Disponibilidade elevada de sódio ou boro;
- Redução da disponibilidade de micronutrientes;
- Presença de contaminantes;
- Hidrofobicidade;
- Compostos orgânicos fitotóxicos;
- Adsorção de nutrientes ou defensivos;
- Partículas finas e poeira;
- Introdução de materiais estranhos;
- Aplicação de produto não homogêneo.

Spokas et al. destacam que limitações científicas, técnicas e econômicas impedem que o biocarvão entregue de forma consistente todos os benefícios frequentemente atribuídos a ele (Spokas et al., 2012). Portanto, registrar respostas nulas ou negativas é tão importante quanto demonstrar efeitos positivos.

7.18 Experimentação e monitoramento

A experimentação local é necessária porque a resposta resulta de uma interação específica. Ensaios de curta duração podem identificar fitotoxicidade e respostas iniciais, mas experimentos de campo por vários ciclos são mais adequados para estimar envelhecimento, efeito residual e estabilidade produtiva.

O monitoramento deve incluir, conforme o objetivo:

- Emergência e sobrevivência;
- Desenvolvimento radicular;
- Crescimento e produtividade;
- Qualidade do produto colhido;
- Análise de tecido vegetal;
- pH, condutividade e alumínio;
- Nutrientes disponíveis;
- Carbono orgânico;
- Densidade, agregação e água disponível;
- Indicadores biológicos;
- Persistência do efeito;
- Custos de produção, transporte e aplicação.

O controle utilizado deve ser explicitado, pois comparar com solo sem fertilização produz interpretação diferente daquela obtida contra o manejo agronômico recomendado.

Todos os resultados devem ser vinculados ao lote aplicado. Sem rastreabilidade, diferenças entre experimentos podem ser atribuídas erroneamente ao solo ou à cultura quando, na realidade, foram provocadas por variações do produto.

7.19 Tabela de decisão agronômica

Quadro 7 – Relação entre diagnóstico do solo, função esperada e critérios para uso agrícola do biocarvão

Diagnóstico ou situação	Função esperada	Propriedades prioritárias do biocarvão	Manejo complementar	Indicadores e riscos
Solo ácido com alumínio elevado	Contribuir para a neutralização da acidez e reduzir a atividade do alumínio	Alcalinidade, capacidade de neutralização, pH, teor de cinzas, cálcio e magnésio	Calagem calculada, adubação e monitoramento do pH	pH, alumínio trocável, saturação por bases e risco de sobrecalagem

Solo arenoso com baixa retenção de nutrientes	Aumentar as cargas superficiais e reduzir as perdas de nutrientes	Capacidade de troca, estabilidade, granulometria, molhabilidade e grau de envelhecimento	Fertilização parcelada, matéria orgânica e cobertura do solo	Nutrientes na solução, lixiviação, produtividade e custo da dose necessária
Baixa disponibilidade de água	Modificar a distribuição de poros e aumentar a retenção hídrica	Porosidade, tamanho das partículas, retenção de água e ausência de hidrofobicidade	Cobertura vegetal, irrigação e práticas de conservação do solo	Água disponível, infiltração, condutividade hidráulica, crescimento radicular e resposta em períodos secos
Deficiência de nutrientes	Fornecer nutrientes ou aumentar sua eficiência de uso	Nutrientes totais e disponíveis, cinzas, pH, condutividade elétrica e capacidade de retenção	Adubação mineral ou orgânica baseada na análise do solo	Estado nutricional, produtividade, salinidade e desequilíbrio entre elementos
Uso conjunto com composto ou esterco	Formar um condicionador enriquecido e biologicamente integrado	Porosidade, segurança, estabilidade e compatibilidade com a compostagem	Cocompostagem controlada e maturação	Relação C/N, estabilidade, nitrato, condutividade elétrica, fitotoxicidade e sanidade
Aplicação em covas, sulcos ou linhas	Concentrar o efeito na zona radicular e reduzir a massa utilizada por hectare	Homogeneidade, granulometria, pH, sais e nutrientes	Mistura uniforme com o solo e ajuste da dose localizada	Concentração efetiva, desenvolvimento radicular e risco de salinidade
Uso em substratos e viveiros	Modificar a aeração, a retenção de água e a nutrição das plantas	Densidade, porosidade, granulometria, pH, condutividade elétrica e fitotoxicidade	Mistura com outros componentes e fertilização equilibrada	Emergência, crescimento, arquitetura radicular e estabilidade do substrato
Solo fértil e sem limitação identificada	Benefício agronômico incerto	Propriedades relacionadas a uma função previamente definida	Realização de experimento em pequena escala antes da ampliação	Ausência de resposta, custo e possíveis desequilíbrios
Solo ou água com salinidade elevada	Uso condicionado ou não recomendado	Condutividade elétrica, sódio, cloretos e composição das cinzas	Manejo da irrigação e avaliação da drenagem	Acúmulo de sais, sodicidade, germinação e produtividade

Fonte: Elaboração autoral com base em Liang et al. (2006), Steiner et al. (2007), Major et al. (2010), Lehmann et al. (2011), Blanco-Canqui (2017), Jeffery et al. (2017), Joseph et al. (2021) e Schmidt et al. (2021).

7.20 Condicionantes para a Amazônia

A aplicação agrícola de biocarvão na Amazônia precisa ser compatível com a dispersão territorial da biomassa, a infraestrutura disponível e a diversidade dos sistemas produtivos. Uma tecnologia agronomicamente eficiente pode não ser viável quando exige transporte de grandes volumes por longas distâncias.

A baixa densidade do produto aumenta o volume transportado por unidade de massa. Por isso, sistemas descentralizados, próximos das fontes de resíduos e das áreas agrícolas, podem reduzir custos. Essa organização depende, entretanto, de controle operacional e capacidade local de caracterização.

A aplicação localizada pode ser particularmente relevante para agricultores familiares, viveiros, hortaliças, fruticultura e sistemas agroflorestais. Ela reduz a demanda total de produto e permite concentrar os efeitos próximos às raízes. A viabilidade deve considerar o trabalho necessário para produzir, resfriar, triturar, umedecer, transportar, misturar e aplicar o material.

A escolha da matéria-prima também precisa respeitar a função ecológica dos resíduos. Nem toda biomassa disponível deve ser removida para pirólise. Parte dos resíduos protege o solo, devolve nutrientes, mantém a matéria orgânica e oferece habitat. A produção de biocarvão deve priorizar fluxos cuja retirada não comprometa essas funções e cuja utilização atual seja problemática ou pouco eficiente.

A adoção responsável exige assistência técnica, unidades demonstrativas e avaliação participativa. O conhecimento dos agricultores sobre o comportamento do solo, das culturas e do regime climático pode orientar a localização dos ensaios e a interpretação das respostas. Entretanto, a observação prática deve ser acompanhada por registros, tratamentos de comparação e análises que permitam distinguir efeitos reais de variações climáticas ou operacionais (Figura 36).

Figura 36 – Experimentação local, monitoramento e avaliação participativa do uso agrícola do biocarvão na Amazônia. *A validação deve comparar tratamentos replicados que permitam separar os efeitos do biocarvão, da fertilização e de suas combinações. O acompanhamento inclui solo, tecido vegetal, crescimento, produtividade, desenvolvimento radicular, água, persistência do efeito e custos de produção, transporte e aplicação. Lotes, amostras e resultados precisam permanecer rastreáveis. Unidades demonstrativas conduzidas com agricultores e assistência técnica ajudam a incorporar conhecimento local, limitações logísticas e variabilidade climática, mas a ampliação de escala somente deve ocorrer após avaliação agronômica, ambiental e econômica.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Steiner et al. (2007), Major et al. (2010), Ye et al. (2020), Joseph et al. (2021), Schmidt et al. (2021) e nas seções 7.17 a 7.20.

7.21 Síntese do capítulo

O biocarvão pode contribuir para o manejo de solos tropicais por meio da correção parcial da acidez, redução da atividade do alumínio, retenção de nutrientes, alteração das propriedades físicas e interação com processos biológicos. Os benefícios tendem a ser mais prováveis quando existe uma limitação diagnosticada que corresponde às propriedades do produto.

As evidências não sustentam sua utilização como solução universal ou substituto automático do calcário, dos fertilizantes, da matéria orgânica ou das práticas conservacionistas. Em muitos sistemas, seu melhor desempenho ocorre quando integrado a outros insumos, principalmente fertilizantes e compostos.

A recomendação deve partir da análise do solo e da caracterização do lote, avançar por ensaios em pequena escala e ser confirmada em condições de campo. Dose, localização, combinação com insumos e tempo de avaliação precisam ser registrados. A produtividade deve ser interpretada juntamente com indicadores químicos, físicos, biológicos, ambientais e econômicos.

No contexto amazônico, o potencial agronômico depende também da disponibilidade sustentável da matéria-prima, da proximidade entre produção e uso, da capacidade de controle da

qualidade e da adaptação às condições dos produtores. O próximo capítulo examinará experiências e aplicações concretas, permitindo analisar como esses princípios se manifestam em diferentes contextos, escalas e arranjos territoriais.

Referências

AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; MUIRHEAD, B.; WRIGHT, G.; BIRD, M. I. Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 213, p. 72–85, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.027.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 687–711, 2017. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017.

EDEH, I. G.; MAŠEK, O.; BUSS, W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties: new insights and future research challenges. **Science of the Total Environment**, v. 714, 136857, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857.

HAGEMANN, N. et al. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. **Nature Communications**, v. 8, 1089, 2017. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0.

JEFFERY, S. et al. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 5, 053001, 2017. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd.

JOSEPH, S. et al. How biochar works, and when it doesn't: a review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1731–1764, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12885.

KAMMANN, C. I. et al. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. **Scientific Reports**, v. 5, 11080, 2015. DOI: https://doi.org/10.1038/srep11080.

LEHMANN, J. et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343–357, 2003. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1022833116184.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LIANG, B. et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1719–1730, 2006. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, p. 117–128, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Nutrient leaching in a Colombian savanna Oxisol amended with biochar. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1076–1086, 2012. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2011.0128.

MELO, L. C. A.; LEHMANN, J.; CARNEIRO, J. S. S.; CAMPS-ARBESTAIN, M. Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis. **Plant and Soil**, v. 472, p. 45–58, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-021-05276-2.

OMONDI, M. O.; XIA, X.; NAHAYO, A.; LIU, X.; KORAI, P. K.; PAN, G. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, v. 274, p. 28–34, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029.

QUESADA, C. A. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1515–1541, 2010. DOI: https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, p. 699–708, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s00374-006-0152-z.

SCHMIDT, H.-P.; KAMMANN, C.; HAGEMANN, N.; LEIFELD, J.; BUCHELI, T. D.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; CAYUELA, M. L. Biochar in agriculture: a systematic review of 26 global meta-analyses. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1708–1730, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12889.

SPOKAS, K. A. et al. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 973–989, 2012. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, v. 291, p. 275–290, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9.

YE, L.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; SHEN, Q.; LEHMANN, J.; SINGH, B.; SABIR, M. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: a meta-analysis of field studies using separate controls. **Soil Use and Management**, v. 36, p. 2–18, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12546.

YUAN, J.-H.; XU, R.-K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 110–115, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00317.x

CAPÍTULO 8

PRODUÇÃO E APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: ESTUDOS DE CASO E EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Antonio Ralyson Nascimento da Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Anne Cristina Barbosa Alves
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Cecília da Silva Brandão
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Alessandra Marie Ohashi
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Arthur Masaaki Maeda Nagase
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Amanda Santos Araújo
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Pedro Henrique Cardoso da Costa
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1295

Este capítulo analisa estudos realizados na Amazônia que envolvem a produção de biocarvão a partir de resíduos orgânicos e florestais e sua aplicação em solos, cultivos, viveiros e áreas degradadas. Os casos são examinados como partes de uma trajetória científica que começa na caracterização do material, avança para os ensaios controlados e, em alguns trabalhos, alcança condições de campo. O objetivo não é apresentar experiências isoladas como comprovação de viabilidade regional, mas compreender o que elas demonstram, quais limites permanecem e como podem contribuir para a construção de sistemas circulares adaptados aos territórios amazônicos.

8.1 O papel e os níveis de evidência dos estudos de caso

Os capítulos anteriores apresentaram os fundamentos da economia circular, as características dos fluxos residuais amazônicos, as tecnologias de conversão, os critérios de qualidade e as possíveis aplicações do biocarvão. Os estudos de caso permitem observar como esses elementos se relacionam quando uma biomassa, um processo e uma finalidade são reunidos em uma situação concreta.

A expressão "estudo de caso" abrange, neste capítulo, trabalhos com diferentes níveis de desenvolvimento. Alguns investigaram apenas a possibilidade de converter determinada biomassa em material carbonoso. Outros avaliaram o produto por meio de incubação com amostras de solo, experimentos em vasos, produção de mudas ou cultivos em casa de vegetação. Um grupo menor avançou para experimentos de campo ou sistemas florestais acompanhados durante vários anos.

Essas escalas não devem ser interpretadas como equivalentes. A caracterização da biomassa e do biocarvão permite conhecer composição, rendimento e propriedades, mas não demonstra necessariamente resposta agronômica. A incubação revela alterações no solo sob condições controladas, enquanto a presença das plantas acrescenta processos como absorção, crescimento radicular, exsudação e demanda nutricional. O experimento de campo incorpora chuvas, erosão, variabilidade espacial, competição entre plantas, manejo e dificuldades operacionais que não são reproduzidas integralmente em laboratório ou casa de vegetação.

Mesmo o experimento de campo não representa, isoladamente, uma cadeia circular consolidada. Para demonstrar implementação territorial, seria necessário acompanhar o fluxo desde a geração do resíduo até o uso final, incorporando disponibilidade da matéria-prima, secagem, transporte, rendimento, consumo energético, emissões, qualidade dos lotes, custos, segurança dos trabalhadores, aceitação dos usuários e distribuição dos benefícios.

Por essa razão, a interpretação dos casos considera o problema investigado, o resíduo utilizado, a tecnologia adotada, a escala experimental, os resultados efetivamente demonstrados e as limitações que impedem sua transferência imediata. Essa leitura evita dois erros recorrentes:

rejeitar um estudo controlado por não representar toda a realidade de campo ou, em sentido contrário, transformar um resultado preliminar em recomendação regional (Figura 37).

Figura 37 – Níveis de evidência e limites de transferência dos estudos de caso sobre biocarvão. *A trajetória de investigação pode começar na caracterização da biomassa e do produto, avançar para incubação do solo, experimentos com plantas em vasos ou casa de vegetação, ensaios de campo e, posteriormente, avaliação territorial. Cada nível acrescenta variáveis e reduz parte das incertezas, mas não comprova automaticamente o nível seguinte. Uma resposta obtida sob condições controladas precisa ser confirmada diante de chuvas, variabilidade espacial, manejo, custos, logística, emissões, segurança, aceitação social e distribuição dos benefícios antes de fundamentar uma recomendação regional.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base na estrutura de níveis de evidência apresentada na seção 8.1 e nos estudos de caso sintetizados no capítulo.

8.2 Terras Pretas e experimentos pioneiros na Amazônia

A relação entre materiais carbonizados e fertilidade dos solos amazônicos possui uma referência histórica nas Terras Pretas de Índio. Esses solos apresentam, em diferentes proporções, carbono pirogênico, fragmentos cerâmicos, resíduos vegetais e animais, nutrientes e sinais de ocupação humana prolongada. Pesquisas arqueológicas, pedológicas e geoquímicas sustentam sua origem antrópica e demonstram que suas propriedades resultam da interação entre manejo humano, deposições sucessivas e processos biogeoquímicos de longa duração (Glaser; Birk, 2012; Lombardo et al., 2022).

Estudo recente também identificou correspondências entre Terras Pretas antigas e práticas contemporâneas de povos indígenas que enriquecem localmente os solos com cinzas, carvão, restos de alimentos e outros materiais. Essa evidência reforça que a formação desses solos não foi um processo acidental ou explicado exclusivamente por fenômenos naturais (Schmidt et al., 2023).

Apesar de sua importância científica, as Terras Pretas não devem ser reduzidas a uma receita baseada na aplicação de carvão. O carbono pirogênico constitui um componente relevante, mas não explica isoladamente a fertilidade, a atividade biológica e a persistência das propriedades observadas. A formação desses solos envolveu integração entre materiais carbonizados, resíduos ricos em nutrientes, ossos, cinzas, matéria orgânica biodegradável e manejo humano repetido durante períodos prolongados.

Essa compreensão produz uma lição importante para a economia circular contemporânea. O desempenho de um material carbonizado pode ser ampliado quando ele participa de um sistema de ciclagem de nutrientes, em vez de ser aplicado como insumo isolado. Ao mesmo tempo, as Terras Pretas são patrimônio arqueológico e cultural. Seu estudo precisa reconhecer a contribuição histórica e os direitos dos povos indígenas, evitando que esse conhecimento seja apropriado apenas como argumento tecnológico ou comercial.

A influência dessa referência histórica pode ser observada nos primeiros experimentos modernos realizados em solos altamente intemperizados da Amazônia Central. Lehmann et al. compararam um solo antrópico amazônico com um Ferralsol e avaliaram alterações na disponibilidade e na lixiviação de nutrientes após a adição de fertilizantes, esterco e carvão. As respostas variaram conforme o tipo de solo, o nutriente e a combinação dos insumos, demonstrando que o efeito do material carbonizado dependia do ambiente em que era aplicado (Lehmann et al., 2003).

Posteriormente, Steiner et al. acompanharam, durante quatro cultivos, os efeitos de carvão, esterco, composto e fertilização mineral em um solo de terra firme da Amazônia Central. O composto apresentou a maior produção acumulada no experimento. O carvão associado ao NPK, por sua vez, duplicou a produção de grãos em comparação com o tratamento que recebeu apenas NPK, além de reduzir o alumínio trocável e contribuir para a manutenção da disponibilidade de nutrientes (Steiner et al., 2007).

A principal contribuição desses resultados não é a demonstração de superioridade universal do carvão. O material carbonizado acrescentou carbono mais persistente e superfícies reativas, mas o composto e o esterco forneceram nutrientes e matéria orgânica biodegradável, enquanto o fertilizante mineral disponibilizou elementos em formas mais prontamente absorvíveis. O desempenho resultou da interação entre funções distintas. Essa constatação sustenta a interpretação de que o biocarvão deve ser incorporado a programas de manejo da fertilidade, e não utilizado como substituto completo dos demais insumos.

Outra experiência inspirada nas Terras Pretas foi instalada em 2003, no município de Tailândia, Pará. O experimento Nova Terra Preta utilizou materiais disponíveis em atividades

locais, entre eles ossos bovinos, carvão de madeira e fragmentos de madeira triturada. Souza et al. avaliaram os efeitos desses resíduos sobre propriedades físicas e hídricas de um solo de textura franco-arenosa (Souza et al., 2022).

Os tratamentos não aumentaram significativamente o teor de carbono orgânico do solo. Entre os materiais avaliados, o carvão apresentou os efeitos físicos mais claros, reduzindo a densidade e aumentando a porosidade total, a microporosidade e a disponibilidade de água. O resultado demonstra que resíduos diferentes, embora disponíveis no mesmo território, não modificam necessariamente o solo da mesma forma.

A ausência de aumento significativo do carbono orgânico também possui valor científico. Ela impede que todos os tratamentos sejam apresentados como meios de rápida acumulação de carbono e mostra a importância de comunicar resultados nulos. Por outro lado, a resposta das propriedades físicas indica que um produto pode desempenhar determinada função mesmo quando outros indicadores permanecem inalterados.

A nomenclatura empregada no experimento exige cautela, pois o material foi descrito como carvão de madeira. Sua equivalência aos biocarvões produzidos segundo critérios contemporâneos dependeria de informações sobre origem, temperatura, tempo de residência, composição e contaminantes. Essa limitação não retira a relevância do estudo, mas restringe a comparação direta com produtos padronizados atualmente.

Em conjunto, as Terras Pretas, os experimentos da Amazônia Central e a experiência de Tailândia estabeleceram uma base conceitual importante. Eles demonstraram que materiais carbonizados podem participar de sistemas duradouros de manejo, que sua resposta depende da associação com outros insumos e que diferentes propriedades do solo podem reagir de forma independente. Esses princípios reaparecem nos estudos mais recentes com resíduos agroindustriais amazônicos.

8.3 Carvão, adubação e produtividade na Amazônia Central

Um conjunto de experimentos conduzidos em solos altamente intemperizados da Amazônia Central avaliou a aplicação de carvão em associação com esterco, composto e fertilizantes minerais. Esses trabalhos ajudaram a estabelecer parte da base científica moderna sobre o uso agrícola de materiais carbonizados em solos tropicais.

Lehmann et al. compararam um solo antrópico amazônico com um Ferralsol, avaliando alterações na disponibilidade e na lixiviação de nutrientes após a adição de fertilizante, esterco e carvão. Os resultados demonstraram que os efeitos dependiam do tipo de solo, do nutriente e da combinação dos insumos (Lehmann et al., 2003).

Posteriormente, Steiner et al. acompanharam durante quatro cultivos os efeitos de carvão, esterco, composto e adubação mineral em um solo de terra firme da Amazônia Central. A aplicação de composto apresentou a maior produção acumulada no experimento. O carvão, quando associado ao NPK, duplicou a produção de grãos em comparação com o tratamento que recebeu apenas NPK. A combinação também reduziu o alumínio trocável e contribuiu para manter maior disponibilidade de nutrientes (Steiner et al., 2007).

O resultado mais importante não é a superioridade universal do carvão, mas a existência de interação entre o material carbonizado e as fontes de nutrientes. O carvão isolado não apresentou o melhor desempenho em todas as situações. Os maiores benefícios ocorreram quando diferentes funções foram combinadas:

- O carvão acrescentou carbono mais persistente e superfícies reativas;
- O composto e o esterco forneceram nutrientes e matéria orgânica biodegradável;
- O fertilizante mineral forneceu elementos em formas prontamente disponíveis;
- A combinação modificou a acidez e o ambiente de retenção dos nutrientes.

O caso mostra que o biocarvão deve ser inserido em programas de fertilidade, e não tratado como substituto completo dos demais insumos. Também evidencia a necessidade de avaliações por vários ciclos, porque alguns efeitos aparecem gradualmente.

8.4 O experimento Nova Terra Preta em Tailândia, Pará

O experimento denominado Nova Terra Preta foi instalado em 2003, no município de Tailândia, estado do Pará, com a proposta de estudar a formação de solos inspirados nas Terras Pretas arqueológicas. Foram utilizados resíduos disponíveis em atividades locais, incluindo ossos bovinos, carvão de madeira e fragmentos de madeira triturada.

Souza et al. avaliaram os efeitos desses materiais sobre as propriedades físicas e hídricas de um solo de textura franco-arenosa. Os tratamentos não aumentaram significativamente o teor de carbono orgânico do solo. Entre os resíduos avaliados, o carvão apresentou os efeitos mais claros sobre as propriedades físicas, reduzindo a densidade e aumentando a porosidade total, a microporosidade e a disponibilidade de água (SOUZA et al., 2022).

O caso possui três aprendizados relevantes. O primeiro é que a disponibilidade regional de um resíduo não garante que ele modificará todas as propriedades esperadas. Ossos e madeira triturada podem exercer outras funções, mas não produziram os mesmos efeitos físicos do carvão nas condições avaliadas.

O segundo aprendizado é a importância dos resultados nulos. A ausência de aumento significativo no carbono orgânico impede afirmar que todos os tratamentos produziram rápida

acumulação de carbono no solo. Esse resultado ajuda a evitar interpretações seletivas que apresentem apenas os benefícios observados.

O terceiro aprendizado é que propriedades físicas podem responder mesmo quando outros indicadores não mostram alterações. O desempenho deve ser avaliado de acordo com a função pretendida. Se o objetivo for aumentar a disponibilidade de água em solo arenoso, densidade, porosidade e curvas de retenção serão mais informativas do que a avaliação isolada da fertilidade química.

A nomenclatura também exige cautela. O material foi descrito como carvão de madeira, e sua equivalência aos biocarvões produzidos segundo padrões atuais depende do conhecimento da matéria-prima, da conversão térmica e da composição. Estudos históricos nem sempre apresentam todas as informações atualmente exigidas para classificação e certificação (Figura 38).

Figura 38 – Terras Pretas e experimentos pioneiros com materiais carbonizados na Amazônia. *As Terras Pretas apresentam horizontes antrópicos formados por deposições sucessivas de carbono pirogênico, fragmentos cerâmicos, ossos, cinzas, resíduos orgânicos e nutrientes associados ao manejo humano de longa duração. Elas constituem patrimônio arqueológico, cultural e científico e não devem ser reduzidas a uma receita de aplicação de carvão. Os experimentos modernos da Amazônia Central e de Tailândia demonstraram que materiais carbonizados podem interagir com composto, esterco e fertilizantes, alterar propriedades físicas, químicas e hídricas e produzir respostas distintas entre solos e indicadores. Resultados nulos também delimitam as funções efetivamente demonstradas.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Lehmann et al. (2003), Steiner et al. (2007), Glaser e Birk (2012), Lombardo et al. (2022), Souza et al. (2022), Schmidt et al. (2023) e nas seções 8.2 a 8.4.

8.5 Produção de biocarvão a partir de resíduos do açaí

O processamento do açaí gera caroços e fibras que podem se acumular próximos aos locais de beneficiamento. A conversão térmica é uma das alternativas propostas para reduzir esse volume e produzir materiais com possíveis aplicações agrícolas, energéticas e ambientais.

Sato et al. estudaram o efeito da temperatura e do tempo de residência sobre a produção de biocarvão a partir de resíduos da agroindústria do açaí. Entre as condições avaliadas, os autores identificaram 600 °C e 60 minutos como uma combinação favorável às propriedades agronômicas consideradas no estudo (Sato et al., 2019).

Esse resultado demonstra que o caroço de açaí pode ser convertido em um material com propriedades ajustáveis. A escolha da temperatura modifica rendimento, teor de cinzas, pH, carbono, porosidade e estabilidade. Entretanto, a condição considerada favorável para uma função não é necessariamente a melhor para todas as finalidades.

Temperaturas mais altas podem aumentar a aromaticidade e modificar a estrutura porosa, mas também reduzem o rendimento gravimétrico e elevam a demanda energética. Para uma unidade produtiva, a escolha precisa conciliar:

- Qualidade desejada;
- Rendimento do biocarvão;
- Consumo de energia;
- Aproveitamento dos gases e vapores;
- Segurança operacional;
- Custo;
- Controle das emissões.

O estudo de pirólise representa a primeira etapa de uma cadeia de evidências. Ele demonstra a possibilidade técnica de produção, mas não comprova sozinho o desempenho agronômico, a segurança de todos os lotes ou a viabilidade econômica em escala comercial.

8.6 Biocarvão de açaí como condicionador de solos

Em trabalho posterior, Sato et al. produziram biocarvão de resíduos do açaí em forno artesanal e avaliaram sua incorporação em dois solos com texturas diferentes. As amostras permaneceram em incubação por 270 dias antes das avaliações físicas e químicas (Sato et al., 2020).

O biocarvão promoveu alterações mais evidentes na qualidade química do que nas propriedades físicas. O material derivado das sementes apresentou potencial para contribuir com a correção da acidez e com a fertilidade. Em contrapartida, os biocarvões de fibras e sementes não produziram aumento consistente da retenção de água nas condições estudadas.

A ausência de melhoria hídrica é cientificamente relevante. A porosidade do biocarvão não garante aumento da água disponível, pois o efeito depende da distribuição dos poros, do tamanho das partículas, da hidrofobicidade, da textura do solo e da proporção aplicada.

O experimento reforça a necessidade de formular hipóteses específicas. Se o produto apresentar alcalinidade e nutrientes, mas não aumentar a água disponível, sua indicação deve estar relacionada às propriedades químicas efetivamente demonstradas.

A incubação prolongada fornece informações sobre a interação entre produto e solo, mas ainda não representa uma validação em lavoura. A presença das plantas pode alterar pH, umidade, atividade microbiana e ciclagem de nutrientes. Por isso, os resultados precisavam ser complementados por experimentos com culturas agrícolas.

8.7 Biocarvão de açaí e mudas de pimenta-do-reino

Mendonça et al. avaliaram uma rota de produção de biocarvão de caroço de açaí utilizando cavacos de madeira como fonte de energia em um forno rústico. O experimento foi realizado no Pará e utilizou mudas de pimenta-do-reino como componente biológico (Mendonça et al., 2024).

O delineamento combinou quatro granulometrias — 3, 5, 7 e 12 mm — com quatro doses — 4, 8, 16 e 32 t ha^{-1} —, além de um controle sem biocarvão. Foram utilizadas cinco repetições.

A interação entre dose e granulometria afetou:

- Retenção e umidade do solo;
- Hidrólise do diacetato de fluoresceína;
- Atividade da arilsulfatase;
- Altura das mudas;
- Desenvolvimento do sistema radicular.

O estudo demonstra que a granulometria não é apenas uma característica de manuseio. Ela interfere no contato entre o biocarvão, o solo, a água, os microrganismos e as raízes. Partículas menores apresentam maior área externa e distribuição mais homogênea, mas podem produzir poeira e maior mobilidade. Partículas maiores possuem poros internos preservados, embora sua interação com o volume de solo possa ser mais localizada.

Os autores consideraram o sistema de produção simples e potencialmente acessível à agricultura familiar. Essa conclusão representa uma indicação de adequação técnica, mas não substitui uma análise econômica completa. A viabilidade depende da disponibilidade da matéria-prima, do combustível, do trabalho, do rendimento, do controle das emissões e da distância entre a produção e a utilização.

Como o experimento utilizou mudas, seus resultados não comprovam aumento de produtividade em pimentais adultos. A transferência exige ensaios de campo que acompanhem estabelecimento, desenvolvimento, sanidade, produção e qualidade dos frutos.

8.8 Biocarvão de açaí, fósforo e feijão-caupi

Braga et al. avaliaram a aplicação conjunta de biocarvão de resíduos de açaí e fertilizante fosfatado em um Ferralsol cultivado com feijão-caupi. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, com cinco doses de biocarvão — 0; 7,5; 15; 30 e 60 t ha^{-1} — e quatro doses de fósforo — 0; 40; 80 e 120 kg ha^{-1} —, totalizando 20 tratamentos (Braga et al., 2025).

As doses mais elevadas de biocarvão e fósforo aumentaram em até 2,3 vezes o teor de fósforo disponível no solo. Esse aumento foi acompanhado por maior concentração do nutriente na biomassa do feijão-caupi. Entretanto, o incremento máximo da eficiência agronômica do fósforo foi de 7,7% no período avaliado.

O biocarvão também aumentou pH, capacidade de troca de cátions e teores de potássio, cálcio e nitrogênio total. Em sentido contrário, ocorreram reduções nos teores de magnésio e alumínio. A glomalina facilmente extraível não respondeu significativamente durante o período experimental.

O caso mostra que uma alteração expressiva no teor disponível de um nutriente não produz necessariamente resposta proporcional na eficiência agronômica ou no crescimento da planta. O aproveitamento depende da demanda da cultura, do desenvolvimento radicular, do tempo de avaliação e de outras limitações do sistema.

As doses de 30 e 60 t ha^{-1} produziram alterações importantes, mas representam grande demanda de biomassa, transporte e aplicação. Antes da recomendação regional, seria necessário comparar doses menores e aplicações localizadas, além de acompanhar vários ciclos em campo.

O experimento também confirma que o biocarvão pode alterar simultaneamente vários nutrientes. A diminuição do magnésio, por exemplo, demonstra que a melhoria de um atributo não elimina a possibilidade de desequilíbrios (Figura 39).

Figura 39 – Trajetória experimental do biocarvão de resíduos do açaí na Amazônia. *Caroços e fibras remanescentes do processamento do açaí podem ser submetidos a secagem, pesagem e pirólise controlada, produzindo lotes com propriedades dependentes da temperatura e do tempo de residência. A cadeia de evidências inclui caracterização do produto, incubação em solos contrastantes, comparação de granulometrias e doses com mudas de pimenta-do-reino e avaliação da interação entre biocarvão e fósforo no feijão-caupi. Os estudos demonstraram alterações químicas, hídricas, biológicas e nutricionais específicas, mas também ausência de resposta em alguns indicadores, necessidade de avaliar desequilíbrios e limitações associadas às doses elevadas e à transferência para o campo.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Sato et al. (2019, 2020), Mendonça et al. (2024), Braga et al. (2025) e nas seções 8.5 a 8.8.

8.9 Casca de castanha-do-brasil, acidez e fósforo

A casca do fruto da castanha-do-brasil apresenta estrutura lignocelulósica resistente e pode representar um resíduo volumoso em determinados locais de processamento. Oliveira et al. avaliaram a produção de biocarvão dessa biomassa a 500 °C e seus efeitos sobre a acidez e o fósforo em um Latossolo Amarelo da Amazônia Central (Oliveira et al., 2020).

O experimento utilizou cinco doses de biocarvão — 0; 20; 40; 60 e 80 t ha^{-1} — combinadas com cinco doses de P_2O_5 — 0; 100; 200; 300 e 400 kg ha^{-1}. O solo foi mantido em vasos durante 365 dias.

Os autores relataram rendimento de aproximadamente 59% na produção do biocarvão. A aplicação reduziu o alumínio e aumentou os teores de fósforo total e disponível à medida que as doses foram elevadas.

O estudo demonstra uma possível correspondência funcional: um resíduo regional foi transformado em produto alcalino e utilizado em solo ácido com baixa disponibilidade de fósforo.

Entretanto, o experimento não incluiu uma cultura agrícola, e as maiores doses avaliadas seriam operacionalmente difíceis em grandes áreas.

A concentração de fósforo disponível representa apenas uma etapa da resposta. São necessários experimentos com plantas para determinar absorção, crescimento, eficiência do fertilizante e possível efeito residual. Também é necessário comparar o produto com calcário, fertilizantes fosfatados, compostos e outras rotas de aproveitamento da casca.

8.10 Resíduos amazônicos na imobilização de elementos potencialmente tóxicos

A mineração aurífera pode produzir solos e rejeitos com concentrações elevadas de elementos potencialmente tóxicos. Nessas condições, a aplicação de resíduos ou biocarvões pode buscar a redução da mobilidade e da biodisponibilidade, e não a remoção total dos contaminantes.

Souza et al. avaliaram solo proveniente de uma área de mineração de ouro de pequena escala no estado do Pará. Foram testados resíduos de café, tegumento de castanha-do-brasil, caroço de açaí e biocarvão de resíduos da castanha-do-brasil (SOUZA et al., 2019).

Os materiais apresentaram comportamentos diferentes conforme o elemento avaliado. Os resíduos da castanha-do-brasil, por exemplo, reduziram os teores disponíveis de bário e chumbo em determinadas condições. Isso demonstra que não existe um material capaz de imobilizar, com a mesma eficiência, todos os contaminantes presentes em um solo multielementar.

A imobilização reduz a fração disponível, mas mantém o contaminante na área. Por isso, o monitoramento de longo prazo é indispensável. Alterações no pH, no potencial de oxirredução, na matéria orgânica ou na drenagem podem modificar novamente a mobilidade.

A aplicação em área contaminada exige:

- Caracterização detalhada do solo ou rejeito;
- Identificação das formas químicas dos contaminantes;
- Análise completa do biocarvão;
- Testes de lixiviação e bioacessibilidade;
- Avaliação da resposta de plantas e organismos;
- Acompanhamento da estabilidade da imobilização;
- Controle da dispersão do material.

Esse caso amplia o conceito de circularidade, pois resíduos amazônicos podem participar da recuperação de passivos ambientais. Porém, a utilização deve ser subordinada à segurança, e não apenas à disponibilidade do material.

8.11 Biocarvão e restauração produtiva na Amazônia equatoriana

Ríos Guayasamín, Smith e Thomas conduziram um experimento de campo durante três anos em florestas secundárias enriquecidas com espécies produtoras de produtos florestais não madeireiros na Amazônia equatoriana. Foram comparados biocarvões produzidos por diferentes métodos locais e tratamentos sem aplicação (Ríos Guayasamín; Smith; Thomas, 2024).

A aplicação aumentou, em geral, matéria orgânica, condutividade elétrica e nutrientes minerais, principalmente potássio, cálcio e magnésio. As respostas foram mais fortes no solo inicialmente mais pobre.

Em relação ao crescimento, o estudo registrou aumento de 29% na biomassa aérea das árvores nos tratamentos com biocarvão produzido em forno e de 23% com material produzido em montículo, em comparação com os respectivos controles.

Esse caso apresenta maior proximidade com condições reais porque foi conduzido em campo e acompanhado por três anos. Também associa restauração florestal a espécies capazes de gerar produtos e renda, aproximando objetivos ecológicos e produtivos.

Ainda assim, o efeito médio não representa resposta uniforme de todas as espécies. Árvores tropicais diferem quanto à fixação biológica de nitrogênio, crescimento, arquitetura radicular e exigência nutricional. A composição do sistema precisa ser considerada na recomendação.

Outra lição é que o efeito foi mais forte no solo de menor fertilidade. Esse resultado reforça o princípio discutido no Capítulo 7: o benefício tende a ser maior quando o biocarvão modifica uma limitação efetivamente presente.

8.12 Biocarvão de açaí, espécies florestais e solos contaminados

Estudos realizados em Belém avaliaram o biocarvão de caroço de açaí em associação com espécies florestais amazônicas cultivadas em solos contaminados. Esses experimentos integram valorização residual, condicionamento do solo e recuperação de áreas degradadas.

8.12.1 Mogno-brasileiro e cobre

Ferreira et al. cultivaram mudas de mogno-brasileiro (*Swietenia macrophylla*) em solo contaminado com 0, 200, 400 e 600 mg kg^{-1} de cobre, combinado com 0%, 5% e 10% de biocarvão de caroço de açaí. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Universidade Federal Rural da Amazônia, em Belém (Ferreira et al., 2024).

O biocarvão foi produzido a 600 °C durante uma hora. A proporção de 5% mitigou os efeitos da contaminação com 200 mg kg^{-1} de cobre, melhorando retenção de água, trocas gasosas,

eficiência do uso da água, altura e número de folhas. Nas maiores concentrações de cobre, o produto não manteve o mesmo nível de proteção.

A proporção de 5% correspondia, no experimento, a uma quantidade estimada em aproximadamente 100 t ha^{-1}. Portanto, embora o resultado fisiológico seja relevante, essa equivalência demonstra a distância entre uma proporção experimental em vasos e uma dose viável em campo.

8.12.2 Ucuúba e cádmio

Braga et al. avaliaram mudas de ucuúba (*Virola surinamensis*) em solo submetido a concentrações crescentes de cádmio e a proporções de 0%, 5% e 10% de biocarvão de caroço de açaí (Braga et al., 2025).

A proporção de 5% apresentou desempenho mais consistente na redução dos efeitos tóxicos, mantendo ou melhorando características biométricas e fisiológicas. A proporção de 10%, principalmente na maior concentração de cádmio, produziu efeitos adversos sobre alguns indicadores de clorofila e trocas gasosas.

O resultado demonstra que aumentar a quantidade de biocarvão não produz necessariamente maior benefício. Uma dose elevada pode modificar excessivamente o pH, reter nutrientes, aumentar sais ou introduzir outras limitações.

Os dois estudos apresentam espécies nativas ou de elevada importância florestal, mas foram conduzidos em vasos e por períodos relativamente curtos. A validação em áreas degradadas precisa considerar:

- Heterogeneidade espacial da contaminação;
- Profundidade do contaminante;
- Sobrevivência das mudas;
- Crescimento por vários anos;
- Absorção e distribuição dos elementos;
- Estabilidade da imobilização;
- Custos e riscos da aplicação;
- Destino da biomassa vegetal produzida.

Esses casos devem ser interpretados como evidências experimentais promissoras, e não como protocolos prontos de remediação (Figura 40).

Figura 40 – Biocarvão na imobilização de contaminantes e na restauração com espécies florestais amazônicas. *A aplicação de resíduos e biocarvões pode reduzir a mobilidade ou a biodisponibilidade de determinados elementos potencialmente tóxicos por adsorção, precipitação e interação com minerais e matéria orgânica, mas não remove os contaminantes do solo. A resposta depende do elemento, do material, do pH, da dose, da espécie vegetal e do tempo. Em experimentos com mogno-brasileiro e ucuúba, proporções intermediárias apresentaram respostas mais equilibradas que doses superiores em determinadas condições. Ensaios de campo em florestas secundárias também indicaram variação entre solos, espécies e métodos de produção, reforçando a necessidade de monitoramento prolongado.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Souza et al. (2019), Ríos Guayasamín, Smith e Thomas (2024), Ferreira et al. (2024), Braga et al. (2025) e nas seções 8.10 a 8.12.

8.13 Aprendizados comuns entre os estudos

Apesar das diferenças de biomassa, solo, cultura e escala, os casos analisados revelam alguns padrões.

8.13.1 A função precisa ser definida

Os resultados mais claros ocorreram quando o estudo relacionou uma propriedade do produto a uma limitação específica. Biocarvões alcalinos foram avaliados em solos ácidos; materiais porosos foram associados a propriedades hídricas; superfícies reativas foram testadas na imobilização de contaminantes.

8.13.2 A combinação com outros insumos é recorrente

Nos experimentos da Amazônia Central, o carvão apresentou melhor desempenho produtivo quando associado a fertilizantes. Nos estudos com feijão-caupi, a interação com fósforo foi central. As Terras Pretas também mostram a integração histórica de materiais carbonizados com resíduos ricos em nutrientes.

8.13.3 Nem todos os indicadores respondem da mesma forma

O biocarvão pode aumentar pH e fósforo disponível sem produzir resposta proporcional na biomassa. Pode melhorar porosidade sem elevar significativamente o carbono orgânico do solo. Pode reduzir a toxicidade em determinada concentração de metal, mas não proteger a planta em concentrações maiores.

8.13.4 Dose e granulometria importam

As respostas da pimenta-do-reino dependeram da combinação entre dose e tamanho de partículas. Nos estudos com espécies florestais e contaminantes, 5% apresentou desempenho superior ou mais equilibrado que 10% em diferentes variáveis.

8.13.5 Resultados nulos são parte da evidência

O estudo com biocarvão de açaí não confirmou aumento generalizado da retenção de água. O experimento Nova Terra Preta não encontrou aumento significativo do carbono orgânico para todos os resíduos. Esses resultados delimitam as condições de aplicação e reduzem o risco de promessas generalizadas.

8.13.6 A escala continua sendo uma limitação

Grande parte das evidências foi produzida em incubação, vasos ou casa de vegetação. Os experimentos de campo ainda são menos numerosos e raramente incluem análise econômica, balanço energético, emissões da produção, aceitação dos produtores e comportamento durante vários anos.

8.14 Tabela comparativo dos estudos de caso

Quadro 8 – Síntese comparativa dos estudos de caso amazônicos sobre biocarvão

Estudo e localização	Biomassa ou material	Escala e sistema	Principais resultados	Limite de transferência
Experimentos da Amazônia Central	Carvão, esterco, composto e fertilizantes	Campo, solo altamente intemperizado e quatro cultivos	O carvão associado ao NPK aumentou a produção e reduziu o alumínio; o composto apresentou elevada produção acumulada	Resultados dependentes da combinação de insumos e das condições locais

Nova Terra Preta, Tailândia–PA	Carvão de madeira, ossos bovinos e madeira triturada	Experimento de campo em solo franco-arenoso	O carvão reduziu a densidade e aumentou a porosidade e a água disponível; não houve aumento significativo de carbono para todos os materiais	Informações limitadas sobre a produção e a padronização do carvão
Pirólise de resíduos de açaí	Resíduos da agroindústria do açaí	Laboratório	Temperatura e tempo de residência determinaram rendimento e propriedades; 600 °C e 60 minutos foram considerados favoráveis para os atributos estudados	Não demonstra, isoladamente, desempenho no solo ou viabilidade econômica
Incubação de biocarvão de açaí	Caroços e fibras de açaí	Dois solos incubados por 270 dias	Alterações químicas mais evidentes que as físicas; potencial de correção da acidez; ausência de aumento consistente da retenção de água	Ausência de plantas e de validação em campo
Pimenta-do-reino, Pará	Biocarvão de caroço de açaí produzido em forno rústico	Produção de mudas; diferentes doses e granulometrias	A dose e o tamanho das partículas afetaram a retenção de água, a atividade enzimática, a altura e o desenvolvimento das raízes	Não comprova produtividade de plantas adultas ou viabilidade comercial
Feijão-caupi e fósforo	Biocarvão de resíduos de açaí	Casa de vegetação, cinco doses de biocarvão e quatro doses de fósforo	Aumento do fósforo disponível, do pH, da CTC e de alguns nutrientes; ganho moderado na eficiência agronômica do fósforo	Doses elevadas e período curto; necessidade de ensaios de campo
Casca de castanha-do-brasil	Biocarvão produzido a 500 °C	Vasos incubados durante 365 dias	Redução do alumínio e aumento do fósforo total e disponível	Não incluiu cultura agrícola e utilizou doses elevadas
Solo de mineração de ouro, Pará	Resíduos de café, açaí e castanha, além de biocarvão de castanha	Ensaio com solo multicontaminado	Respostas diferentes entre materiais e elementos; resíduos de castanha reduziram frações disponíveis de Ba e Pb	A imobilização precisa ser acompanhada em longo prazo

Floresta secundária, Amazônia equatoriana	Biocarvões produzidos por dois métodos locais	Campo, três anos, com espécies florestais não madeireiras	Aumento de nutrientes e da biomassa aérea; respostas mais intensas no solo inicialmente mais pobre	Respostas específicas conforme o solo, a espécie e o método de produção
Mogno-brasileiro e cobre, Belém–PA	Biocarvão de caroço de açaí	Casa de vegetação	A proporção de 5% mitigou os efeitos de 200 mg kg^{-1} de Cu e melhorou variáveis fisiológicas	Dose equivalente elevada e ausência de validação em campo
Ucuúba e cádmio, Belém–PA	Biocarvão de caroço de açaí	Casa de vegetação	A proporção de 5% apresentou resposta mais equilibrada; 10% produziu efeitos adversos em algumas variáveis	Resultado de curta duração e dependente da concentração do contaminante

Fonte: Elaboração autoral com base em Lehmann et al. (2003), Steiner et al. (2007), Sato et al. (2019, 2020), Souza et al. (2019, 2022), Oliveira et al. (2020), Ríos Guayasamín, Smith e Thomas (2024), Mendonça et al. (2024), Ferreira et al. (2024) e Braga et al. (2025)

8.15 Indicadores para avaliar impactos regionais

Um experimento positivo não demonstra, por si só, que uma cadeia circular foi estabelecida. A avaliação de impactos precisa acompanhar o fluxo completo, desde a geração do resíduo até o desempenho final do produto.

8.15.1 Indicadores materiais

Devem registrar:

- Quantidade de resíduo gerada;
- Fração realmente disponível;
- Umidade e necessidade de secagem;
- Massa destinada à pirólise;
- Rendimento do biocarvão;
- Coprodutos gerados;
- Perdas no transporte e na aplicação;
- Destinação de materiais não aproveitados.

8.15.2 Indicadores técnicos

Incluem:

- Estabilidade operacional do equipamento;
- Consumo de combustível;

- Temperatura e tempo de residência;
- Rendimento por lote;
- Uniformidade do produto;
- Controle das emissões;
- Frequência de manutenção;
- Segurança dos trabalhadores.

8.15.3 Indicadores agronômicos e ambientais

Podem incluir:

- pH, alumínio e capacidade de troca;
- Disponibilidade e perdas de nutrientes;
- Água disponível;
- Atividade biológica;
- Crescimento e produtividade;
- Qualidade da produção;
- Persistência dos efeitos;
- Mobilidade de contaminantes;
- Estabilidade do carbono;
- Possíveis impactos sobre solo e água.
-

8.15.4 Indicadores econômicos

A análise deve considerar:

- Custo de coleta e segregação;
- Transporte da biomassa;
- Secagem e preparação;
- Produção e controle da qualidade;
- Transporte do biocarvão;
- Aplicação;
- Valor dos coprodutos;
- Economia de outros insumos;
- Aumento de produtividade;
- Duração do benefício.

8.15.5 Indicadores sociais e territoriais

Também são relevantes:

- Participação dos produtores;
- Geração e qualidade do trabalho;
- Distribuição dos custos e benefícios;
- Compatibilidade com conhecimentos locais;
- Participação de mulheres, jovens e comunidades tradicionais;
- Acesso a equipamentos e assistência técnica;
- Aceitação do produto;
- Governança da matéria-prima.

Esses indicadores evitam que a circularidade seja medida apenas pela quantidade de resíduo transformada. Um sistema pode reduzir o descarte, mas gerar emissões, custos ou riscos superiores aos da alternativa anterior. O impacto precisa ser avaliado de forma integrada.

8.16 Lacunas reveladas pelos casos

Os estudos demonstram avanços importantes, especialmente na valorização do caroço de açaí e da casca de castanha-do-brasil. Entretanto, ainda existem lacunas para a consolidação regional.

A primeira é a pequena quantidade de experimentos de campo com duração prolongada. Incubações e ensaios em vasos são necessários, mas não reproduzem erosão, chuvas intensas, variação de temperatura, distribuição radicular e heterogeneidade espacial.

A segunda é o uso frequente de doses elevadas. Proporções de 5% e 10% em vasos podem equivaler a dezenas ou centenas de toneladas por hectare. Essas doses são úteis para identificar mecanismos, mas raramente são viáveis em grandes áreas. Estudos futuros devem comparar aplicações localizadas e doses compatíveis com a disponibilidade regional.

A terceira lacuna é a ausência de caracterização completa em alguns trabalhos. Matéria-prima, temperatura máxima, tempo de residência, relação H orgânico, contaminantes, granulometria e estabilidade precisam ser informados para permitir comparação e reprodução.

A quarta é a limitada integração entre desempenho agronômico e balanços ambientais. A permanência do carbono no solo não compensa automaticamente emissões elevadas durante secagem, produção ou transporte.

A quinta é a falta de comparação com alternativas. O biocarvão precisa ser confrontado com compostagem, uso energético, cobertura do solo, aplicação direta controlada, produção de materiais e disposição convencional.

A sexta é a escassez de avaliações econômicas e sociais associadas aos experimentos agronômicos. A descrição de um forno como simples ou de baixo custo precisa ser confirmada por dados de investimento, manutenção, rendimento, trabalho, mercado e risco.

Por fim, ainda é limitada a representação da diversidade amazônica. São necessários estudos em diferentes solos, regimes hídricos, cadeias produtivas e sistemas de cultivo, incluindo várzeas, terras firmes, sistemas agroflorestais, horticultura, produção de mudas, culturas perenes e recuperação de áreas degradadas (Figura 41).

Figura 41 – Indicadores integrados para converter estudos de caso em sistemas circulares territoriais. *A implementação responsável precisa acompanhar o fluxo desde a disponibilidade e a segregação dos resíduos até a produção, o controle de emissões, a qualidade dos lotes, a aplicação e o desempenho final. Indicadores materiais, técnicos, agronômicos, ambientais, econômicos, sociais e territoriais devem ser avaliados conjuntamente. Unidades descentralizadas podem reduzir distâncias e aproximar pesquisa, produção e uso, mas precisam demonstrar segurança, estabilidade operacional, balanço ambiental, viabilidade econômica, participação social, assistência técnica e governança da matéria-prima. A quantidade de resíduo transformada, isoladamente, não comprova circularidade.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base nos estudos sintetizados no Quadro 8.1 e nas seções 8.13 a 8.16.

8.17 Síntese do capítulo

Os estudos de caso demonstram que resíduos amazônicos podem ser transformados em biocarvões com propriedades agrícolas e ambientais relevantes. O caroço de açaí apresenta a trajetória de pesquisa mais diversificada, abrangendo produção, incubação em solos, nutrição fosfatada, desenvolvimento de mudas e mitigação da toxicidade de metais.

A casca de castanha-do-brasil também apresenta potencial para correção da acidez, alteração da disponibilidade de fósforo e imobilização de determinados contaminantes.

Experimentos de campo na Amazônia Central, em Tailândia e no Equador mostram que os efeitos podem persistir e contribuir para propriedades físicas, fertilidade e crescimento de árvores.

Os casos também revelam limites claros. As respostas dependem da dose, granulometria, matéria-prima, solo, espécie e associação com outros insumos. Propriedades químicas podem melhorar sem resposta proporcional das plantas, doses maiores podem produzir efeitos adversos e muitos resultados ainda foram obtidos somente em condições controladas.

Portanto, a principal contribuição dos estudos não é oferecer uma receita única, mas mostrar como hipóteses devem ser construídas e testadas. A passagem de um experimento promissor para uma solução territorial exige padronização do produto, segurança, validação em campo, viabilidade econômica, participação social e governança dos resíduos.

O próximo capítulo examinará as políticas públicas, as barreiras tecnológicas e econômicas, os desafios logísticos e os instrumentos necessários para transformar essas experiências em sistemas de implementação responsáveis.

Referências

BRAGA, A. R. O.; JOHN, V.; DANIELLI, C. K. A. O.; SOUSA, H. M.; DANIELLI, F. E.; MARQUES-DOS-SANTOS, C. S. C.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S. Açaí waste biochar combined with phosphorus fertiliser and phosphorus use efficiency in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Agronomy**, v. 15, n. 2, 393, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15020393.

BRAGA, D. G. et al. Biometric and physiological responses of *Virola surinamensis* to cadmium and biochar in Amazonian soil. **Scientific Reports**, v. 15, 21325, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-05656-z.

FERREIRA, R. L. C. et al. Biochar improves growth and physiology of *Swietenia macrophylla* King in contaminated soil by copper. **Scientific Reports**, v. 14, 22546, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-74356-x.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia: Terra Preta de Índio. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 82, p. 39–51, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029.

LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343–357, 2003. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1022833116184.

LOMBARDO, U. et al. Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 13, 3444, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2.

MENDONÇA, M. S. et al. Açai seed biochar improves soil quality and black pepper seedling development in the Amazon region. **Journal of Environmental Management**, v. 367, 121752, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121752.

OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S.; DAMACENO, J. B. D.; GUERRINI, I. A. Biochar yield from shell of Brazil nut fruit and its effects on soil acidity and phosphorus availability in Central Amazonian Yellow Oxisol. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 3, p. 222, 2020. DOI: https://doi.org/10.5539/jas.v12n3p222.

RÍOS GUAYASAMÍN, P. D.; SMITH, S. M.; THOMAS, S. C. Biochar effects on NTFP-enriched secondary forest growth and soil properties in Amazonian Ecuador. **Journal of Environmental Management**, v. 350, 119068, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119068.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar from Acai agroindustry waste: study of pyrolysis conditions. **Waste Management**, v. 96, p. 158–167, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.022.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açaí waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36–46, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001.

SCHMIDT, M. J. et al. Intentional creation of carbon-rich dark earth soils in the Amazon. **Science Advances**, v. 9, n. 38, eadh8499, 2023. DOI: https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8499.

SOUZA, E. S.; DIAS, Y. N.; COSTA, H. S. C.; PINTO, D. A.; OLIVEIRA, D. M.; FALCÃO, N. P. S.; TEIXEIRA, R. A.; FERNANDES, A. R. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 169, p. 425–434, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.032.

SOUZA, L. C.; LIMA, H. V.; RODRIGUES, S.; TORRES, L. C.; KERN, D. C. Anthropogenic soil experiment in Brazil Amazon: changes in soil physical properties by organic residues. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 53, n. 4, p. 533–543, 2022. DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017956.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, v. 291, p. 275–290, 2007. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-007-9193-9



PARTE III

SUSTENTABILIDADE, IMPLEMENTAÇÃO E FUTURO

CAPÍTULO 9

IMPLEMENTAÇÃO DE CADEIAS DE BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: POLÍTICAS PÚBLICAS, BARREIRAS E ESTRATÉGIAS

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Kalil Oliveira Belém
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Ana Carollyne Pereira da Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Mauricio Willians de Lima
Universidade Estadual do Amapá (UEAP)

Daniel Silva Rodrigues
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Yanna Karolynne Pereira da Silva
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Lilian Bastos dos Santos Campos
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Estela Siqueira do Nascimento Nunes
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Pedro Lucas Magno Bulhões
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1296

A transformação de resíduos amazônicos em biocarvão não depende apenas da existência de biomassa ou do domínio da pirólise. Sua implementação exige articulação entre políticas públicas, enquadramento regulatório, controle ambiental, logística, financiamento, capacitação, participação social e formação de mercados. Este capítulo examina essas condições e propõe uma rota escalonada para converter resultados experimentais em sistemas territoriais seguros, economicamente consistentes e socialmente legítimos.

9.1 Da evidência experimental à implementação territorial

Os estudos apresentados no Capítulo 8 demonstram que diferentes resíduos amazônicos podem ser transformados em materiais carbonosos com funções agrícolas e ambientais. Contudo, a passagem do experimento para a implementação não ocorre de maneira automática. Uma tecnologia que apresenta bom desempenho em laboratório pode enfrentar limitações quando submetida à variabilidade da matéria-prima, à umidade elevada, às distâncias de transporte, à necessidade de manutenção e às exigências regulatórias.

A ampliação de escala acrescenta perguntas que não são respondidas exclusivamente por ensaios agronômicos. É necessário determinar quanto resíduo está realmente disponível durante o ano, qual parcela já possui usos economicamente ou ecologicamente relevantes, onde o material se encontra, como será transportado, quais emissões serão produzidas, quem operará os equipamentos e quem assumirá os riscos financeiros e ambientais.

Também é preciso estabelecer a finalidade do produto. Um biocarvão destinado ao condicionamento do solo enfrenta exigências diferentes daquelas aplicáveis a um combustível, adsorvente, componente de substrato ou material empregado na remediação de áreas contaminadas. A mesma unidade produtiva pode gerar materiais com características distintas entre os lotes, o que torna indispensável relacionar matéria-prima, condições de produção, propriedades do produto e uso final.

A implementação territorial deve ser tratada, portanto, como processo progressivo de construção de evidências. A caracterização da biomassa antecede a seleção tecnológica; o teste tecnológico antecede a unidade demonstrativa; e a unidade demonstrativa antecede a expansão comercial. Em cada etapa, a decisão de avançar precisa ser sustentada por resultados técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

9.2 Políticas públicas e valorização de resíduos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece uma ordem de prioridade que começa pela não geração e pela redução, passa pela reutilização, reciclagem e tratamento e termina na

disposição ambientalmente adequada dos rejeitos. A legislação também reconhece o resíduo reutilizável ou reciclável como bem econômico e de valor social e inclui instrumentos como pesquisa científica, incentivos financeiros, cooperação entre os entes federativos e formação de consórcios (Brasil, 2010; Brasil, 2022a).

Nesse contexto, a pirólise pode representar uma rota de tratamento e valorização, mas sua adoção não deve ser justificada somente pela capacidade de reduzir o volume de resíduos. Antes da escolha, é necessário verificar se a biomassa pode ser evitada, reutilizada diretamente, compostada, destinada à alimentação animal, empregada como cobertura do solo ou aproveitada em outro processo de maior valor territorial.

A classificação de uma rota como circular depende do sistema completo. A produção de biocarvão pode reduzir o descarte inadequado e gerar um produto útil, mas também pode consumir combustível, emitir poluentes, exigir transporte intensivo ou competir com usos existentes. A decisão deve comparar cenários e considerar o ciclo de vida, conforme defendido nos estudos de avaliação ambiental de sistemas de biocarvão (Woolf et al., 2010; Roberts et al., 2010).

Os planos municipais, intermunicipais e estaduais de resíduos constituem instrumentos importantes para essa avaliação. Eles podem identificar fluxos prioritários, responsabilidades dos geradores, áreas de processamento, necessidades de infraestrutura e formas de cooperação. Para a Amazônia, a coordenação intermunicipal pode ser especialmente relevante quando a produção de um único município não é suficiente para sustentar uma unidade ou quando os mercados consumidores estão distribuídos em uma área maior.

A política de resíduos deve evitar dois extremos. O primeiro é considerar toda biomassa descartada como recurso imediatamente disponível, ignorando limitações de coleta e usos locais. O segundo é classificar todo material residual como rejeito sem investigar possibilidades seguras de aproveitamento. Entre essas posições, é necessário construir inventários territoriais, critérios de prioridade e mecanismos de monitoramento.

9.3 Estratégias de bioeconomia na Amazônia

A Estratégia Nacional de Bioeconomia, instituída pelo Decreto nº 12.044/2024, define a bioeconomia como modelo baseado em justiça, ética, inclusão, uso sustentável dos recursos biológicos, conservação, regeneração e integração entre conhecimentos científicos e tradicionais. Entre suas diretrizes encontram-se a descarbonização dos processos produtivos, a valorização da biodiversidade, a geração de trabalho e renda e a prevenção da conversão de vegetação nativa (Brasil, 2024a).

O Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia vem sendo construído como instrumento de implementação dessa estratégia. A Resolução CNBio nº 8, de março de 2026, propôs metas e aprovou componentes relacionados a salvaguardas, informação, financiamento, impactos e ciência, tecnologia e inovação (CNBIO, 2026). Esse ambiente institucional pode favorecer projetos que integrem gestão de resíduos, inovação tecnológica, descarbonização e desenvolvimento territorial.

Entretanto, a associação com a bioeconomia não é garantida apenas porque o processo utiliza biomassa. Um projeto pode empregar matéria-prima biológica e, ainda assim, concentrar renda, retirar recursos acima da capacidade de regeneração ou manter os territórios como fornecedores de materiais de baixo valor. A contribuição do biocarvão para a bioeconomia amazônica depende da origem da biomassa, da localização do processamento, da participação dos atores locais e da distribuição dos benefícios.

O processamento próximo à geração do resíduo pode reduzir o transporte de materiais úmidos e volumosos, criar capacidades técnicas locais e permitir que parte do valor permaneça no território. Em contrapartida, a descentralização não deve ser confundida com redução dos requisitos de segurança. Unidades pequenas também precisam controlar emissões, proteger os trabalhadores, registrar os lotes e demonstrar a qualidade do produto.

Estudos sobre a bioeconomia amazônica mostram que a construção de cadeias sustentáveis depende de governança experimental, aprendizagem institucional e adaptação às condições locais (Pinsky; Marcovitch; Val, 2024). A política pública, nesse sentido, não deve impor um modelo tecnológico único. Sua função é estabelecer objetivos, salvaguardas, critérios de desempenho e mecanismos de aprendizagem (Figura 42).

Figura 42 – Articulação entre política de resíduos, bioeconomia e governança territorial. *A seleção de uma rota para os resíduos deve respeitar a prioridade da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento, comparando a pirólise com compostagem, cobertura do solo, alimentação animal, aproveitamento energético e outros usos territorialmente relevantes. A contribuição para a bioeconomia amazônica depende da origem sustentável da biomassa, da conservação da vegetação nativa, do processamento compatível com o território, da participação dos atores locais e da distribuição dos benefícios. A política pública deve estabelecer objetivos, salvaguardas e critérios de desempenho, sem impor uma solução tecnológica única.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Brasil (2010, 2022a, 2024a), Pinsky, Marcovitch e Val (2024), CNBio (2026) e nas seções 9.2 e 9.3.

9.4 Enquadramento regulatório do biocarvão no Brasil

O biocarvão pode assumir diferentes enquadramentos conforme sua composição, finalidade declarada e forma de comercialização. Quando apresentado para melhorar propriedades físicas, físico-químicas ou a atividade biológica do solo, pode aproximar-se da categoria de condicionador de solo. Quando possui nutrientes e a alegação principal envolve seu fornecimento às plantas, outros enquadramentos aplicáveis aos insumos agrícolas podem ser considerados.

A Lei nº 6.894/1980 e o Decreto nº 4.954/2004 estabelecem a base para inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes, biofertilizantes, remineralizadores, substratos e condicionadores destinados à agricultura (Brasil, 1980; Brasil, 2004). Normas complementares do Ministério da Agricultura e Pecuária estabelecem requisitos relacionados ao registro de estabelecimentos e produtos, garantias, matérias-primas, contaminantes e rotulagem.

A Instrução Normativa MAPA nº 35/2006 trata de corretivos, inoculantes, biofertilizantes e condicionadores; a Instrução Normativa nº 53/2013 disciplina procedimentos de registro; e a Instrução Normativa nº 61/2020 estabelece regras para fertilizantes orgânicos e biofertilizantes. Esses instrumentos precisam ser avaliados de acordo com a formulação e a indicação específica do

produto. Não é adequado afirmar que todo biocarvão pertence automaticamente a uma única categoria regulatória.

A definição deve anteceder a comercialização. Denominação, composição, garantias, modo de aplicação e alegações precisam ser compatíveis entre si. Um produto anunciado como capaz de corrigir acidez, fornecer nutrientes, aumentar a retenção de água, imobilizar contaminantes e sequestrar carbono apresenta um conjunto amplo de alegações, cada uma dependente de demonstração própria. A multiplicação de promessas sem evidência aumenta o risco regulatório e compromete a confiança do usuário.

Em 2026, o Decreto nº 12.858 reforçou os programas de autocontrole aplicáveis aos insumos agrícolas. Esses programas devem assegurar identidade, qualidade, inocuidade e rastreabilidade, com procedimentos proporcionais ao porte do agente e aos riscos identificados. A norma também prevê controles documentados, verificação do processo e análises realizadas por laboratórios habilitados para o escopo correspondente (Brasil, 2026).

O enquadramento concreto deve ser confirmado com os órgãos competentes antes do investimento comercial. Essa consulta prévia permite definir quais documentos, registros, ensaios e garantias serão necessários e evita que uma unidade tecnicamente funcional produza material que não possa ser regularmente comercializado para a finalidade pretendida.

9.5 Qualidade, certificação e confiança no produto

A qualidade do biocarvão não pode ser reduzida ao teor de carbono. Como demonstrado no Capítulo 6, a avaliação precisa abranger matéria-prima, processo, estabilidade, pH, condutividade elétrica, nutrientes, cinzas, granulometria e contaminantes. A importância relativa de cada propriedade depende da aplicação.

Um material destinado à correção da acidez precisa demonstrar alcalinidade e segurança. Para uso em substratos, granulometria, salinidade, porosidade e resposta das plantas tornam-se centrais. Quando o produto for empregado na imobilização de contaminantes, serão necessários testes específicos de sorção, lixiviação, ecotoxicidade e estabilidade. Para alegações climáticas, o teor de carbono, a estabilidade e a contabilização das emissões da cadeia assumem maior relevância.

Padrões voluntários podem complementar as exigências legais. O *European Biochar Certificate* apresenta categorias, matérias-primas permitidas, parâmetros analíticos e requisitos de sustentabilidade que auxiliam a organização dos programas de qualidade (EBC, 2025). Entretanto, um padrão internacional não substitui o cumprimento da legislação brasileira nem elimina a necessidade de ensaios adaptados aos solos, cultivos e condições de uso locais.

A certificação também não deve ser confundida com garantia universal de desempenho. Ela pode demonstrar que o produto atende a limites e procedimentos previamente estabelecidos, mas não assegura que produzirá o mesmo efeito em todos os solos. A confiança precisa resultar da associação entre conformidade do lote, transparência das informações e evidência de desempenho para a finalidade declarada.

Em unidades pequenas, o custo das análises pode ser significativo. Uma solução possível é organizar programas escalonados de caracterização, como proposto no Capítulo 6, e estruturar redes compartilhadas de laboratórios. Análises básicas podem ser realizadas com maior frequência, enquanto ensaios mais complexos são aplicados periodicamente, quando houver mudança de matéria-prima, alteração do processo ou identificação de risco.

9.6 Licenciamento, emissões e segurança operacional

A pirólise envolve aquecimento de biomassa e geração de gases, vapores, partículas e calor. Mesmo quando os produtos gasosos são recirculados ou utilizados como fonte de energia, o sistema precisa ser projetado para impedir combustão incompleta, vazamentos e exposição dos trabalhadores.

A competência para o licenciamento ambiental é definida conforme a natureza, localização e abrangência dos impactos, observando a Lei Complementar nº 140/2011 e as normas do ente responsável. A Lei nº 15.190/2025 estabeleceu normas gerais para o licenciamento ambiental e reforçou princípios como prevenção do dano, transparência, participação pública e proporcionalidade entre procedimento, porte e potencial poluidor (Brasil, 2011; Brasil, 2025a).

O porte reduzido não significa ausência de impacto. Fornos artesanais ou mal vedados podem emitir fumaça, monóxido de carbono, material particulado e compostos orgânicos. A Resolução Conama nº 382/2006 estabelece limites de emissão para fontes fixas e constitui uma referência a ser considerada juntamente com normas estaduais, condicionantes da licença e características do processo (CONAMA, 2006).

A melhoria do equipamento deve buscar combustão eficiente dos gases, redução das entradas descontroladas de oxigênio e monitoramento das condições térmicas. O aproveitamento energético dos vapores pode reduzir a demanda externa de combustível, mas precisa ser acompanhado por projeto adequado e mecanismos de segurança.

Os riscos ocupacionais incluem queimaduras, inalação de gases e poeiras, esforço físico, ruído, incêndio e explosão de partículas finas. O resfriamento incompleto do biocarvão pode provocar reignição durante o armazenamento. A moagem e o peneiramento também podem

dispersar material particulado. Esses riscos exigem procedimentos operacionais, ventilação, equipamentos de proteção, sinalização, treinamento, plano de emergência e registro de incidentes.

O licenciamento e a segurança não devem ser tratados como documentos produzidos apenas para iniciar a operação. Eles precisam orientar o projeto do equipamento, a localização da unidade, o armazenamento da biomassa, o controle de emissões e a resposta a emergências.

9.7 Rastreabilidade e governança da matéria-prima

Uma cadeia de biocarvão começa antes da pirólise. A origem da biomassa determina parte dos riscos ambientais, jurídicos e reputacionais do produto. Resíduos agroindustriais segregados apresentam perfil diferente de madeira de origem desconhecida, lodos, resíduos urbanos misturados ou materiais tratados com preservantes.

A rastreabilidade deve identificar o gerador, o local de origem, o tipo de material, a data de recebimento, a massa, a umidade e possíveis fontes de contaminação. Essas informações precisam acompanhar o lote durante a secagem, conversão, processamento e comercialização.

A classificação de um material como resíduo não elimina a necessidade de comprovar sua origem legal. Da mesma forma, a demanda por matéria-prima não pode estimular retirada de madeira nativa, conversão de vegetação ou exploração acima da capacidade de regeneração. O Decreto nº 12.044/2024 é explícito ao associar a bioeconomia à conservação e a sistemas de produção de biomassa que não provoquem conversão da vegetação nativa.

A rastreabilidade também permite identificar mudanças capazes de alterar o produto. Misturas de caroço de açaí com serragem, por exemplo, podem modificar cinzas, densidade, rendimento, pH e nutrientes. Se a composição não for registrada, diferenças entre lotes serão atribuídas ao acaso, dificultando o controle de qualidade e a recomendação agronômica.

Em cadeias comunitárias, a governança da biomassa deve definir quem pode fornecer material, como o preço será calculado, quem arcará com a coleta e quais critérios impedirão a apropriação indevida de recursos coletivos. Contratos simples, registros de entrega e regras de decisão transparentes podem ser mais importantes para a continuidade da iniciativa do que estruturas administrativas excessivamente complexas (Figura 43).

Figura 43 – Sistema integrado de enquadramento regulatório, autocontrole, licenciamento, segurança e rastreabilidade do biocarvão. *A finalidade declarada do produto orienta seu enquadramento, as garantias, os ensaios e a documentação necessários. A rastreabilidade começa na origem legal da biomassa e acompanha recebimento, umidade, preparação, condições térmicas, resfriamento, processamento, amostragem, análises, armazenamento e expedição. Programas de autocontrole, laboratórios habilitados, controle de emissões, prevenção de incêndios, proteção dos trabalhadores e retenção de amostras sustentam identidade, qualidade e inocuidade. Certificações voluntárias podem complementar, mas não substituir, a legislação brasileira nem comprovar desempenho universal.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Brasil (1980, 2004, 2011, 2025a, 2026), Conama (2006), European Biochar Certificate (2025) e nas seções 9.4 a 9.7.

9.8 Barreiras tecnológicas, manutenção e escolha da escala

A seleção de uma tecnologia precisa começar pelas características da biomassa e do produto desejado. Equipamentos concebidos para madeira seca e homogênea podem apresentar baixo desempenho com caroços, fibras, cascas ou resíduos úmidos. A adaptação deve considerar tamanho das partículas, densidade aparente, teor de cinzas, umidade, comportamento durante a alimentação e necessidade de secagem.

A quantidade teórica de resíduo gerada não corresponde à quantidade de biocarvão disponível. Uma estimativa inicial pode ser expressa por:

$$Qb = Qr \setminus Fd \setminus Fc \setminus Rb$$

Nessa expressão, (Qb) representa a quantidade estimada de biocarvão; (Qr), a massa de resíduo úmido gerada; (Fd), a fração de matéria seca; (Fc), a fração tecnicamente coletável, legalmente disponível e não comprometida com usos prioritários; e (Rb), o rendimento do biocarvão em base seca.

A equação evidencia por que estimativas baseadas apenas na massa bruta superestimam o potencial. Um resíduo com elevada umidade, distribuição dispersa ou uso agrícola já estabelecido pode fornecer quantidade muito menor do que a registrada nas estatísticas de produção.

A capacidade anual do equipamento também precisa incorporar sua disponibilidade operacional:

$$Q = Ch \backslash Hd \backslash Da \backslash Fo$$

Em que (Ch) representa a capacidade horária, (Hd) o número de horas de funcionamento diário, (Da) os dias programados por ano e (Fo) o fator de disponibilidade operacional. Esse último incorpora paradas para manutenção, falta de biomassa, treinamento, chuvas, falhas de energia e outras interrupções.

O dimensionamento baseado em capacidade nominal e operação contínua pode produzir uma unidade superdimensionada. Em regiões com sazonalidade acentuada, equipamentos modulares ou operação por campanhas podem ser mais adequados. Em outros casos, uma unidade centralizada pode apresentar melhor controle térmico e ambiental, desde que o custo de transporte não elimine os benefícios de escala.

A manutenção representa uma barreira frequentemente subestimada. Equipamentos importados ou construídos com componentes difíceis de substituir podem permanecer inativos durante longos períodos. A seleção deve considerar disponibilidade de peças, capacidade de fabricação local, facilidade de inspeção, tempo de reparo e formação de operadores. Uma tecnologia mais simples e reparável pode apresentar maior desempenho anual do que um equipamento sofisticado com baixa disponibilidade.

9.9 Logística territorial e modelos de produção

A logística amazônica é condicionada por grandes distâncias, sazonalidade hidrológica, diversidade de modais e concentração desigual da infraestrutura. Em determinadas regiões, o transporte fluvial é dominante; em outras, estradas apresentam condições variáveis ao longo do ano. Esses fatores afetam coleta, fornecimento de peças, acesso dos técnicos e distribuição do produto.

O transporte de resíduos úmidos e volumosos tende a apresentar baixa eficiência. Por isso, operações como segregação, redução de tamanho e secagem devem ser avaliadas próximas à fonte. A produção local do biocarvão reduz a massa transportada, mas transfere para o território a necessidade de controle operacional e ambiental.

Não existe uma configuração logística universal. Unidades fixas próximas a agroindústrias podem funcionar quando o fluxo é concentrado e relativamente estável. Polos cooperativos podem reunir resíduos de vários geradores e compartilhar equipamentos e laboratórios. Unidades móveis podem atender fluxos sazonais ou dispersos, mas seu custo de deslocamento, montagem, licenciamento e operação precisa ser demonstrado.

Castro et al. destacam que a integração entre circularidade, logística descentralizada e governança territorial é necessária para estruturar cadeias bioeconômicas amazônicas resilientes (Castro et al., 2026). Essa integração significa que a localização da unidade não deve ser decidida apenas pelo menor custo industrial. Deve-se considerar origem dos resíduos, destino do biocarvão, acesso a trabalhadores, infraestrutura, riscos ambientais e distribuição dos benefícios.

A logística reversa também pode ser explorada. Veículos que entregam produtos ou insumos em determinada região podem retornar transportando biomassa preparada ou biocarvão, desde que as condições sanitárias, de segurança e de acondicionamento sejam compatíveis. A viabilidade precisa ser calculada por rota e período do ano, evitando médias anuais que ocultem meses de interrupção ou custos excepcionais (Figura 44).

Figura 44 – Modelos logísticos e escalas de produção de biocarvão no território amazônico. *Unidades fixas próximas a agroindústrias podem atender fluxos concentrados e regulares; polos cooperativos podem reunir materiais de diferentes geradores e compartilhar secagem, equipamentos, armazenamento e laboratórios; unidades móveis podem operar por campanhas em áreas com oferta sazonal ou dispersa. A escolha depende da umidade, da fração efetivamente disponível, das condições rodoviárias e fluviais, da distância até o uso final, da manutenção, do acesso a peças e da capacidade de controle ambiental. A maior escala nominal não é necessariamente a mais eficiente ou resiliente.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Meyer, Glaser e Quicker (2011), Sahoo et al. (2019), Castro et al. (2026) e nas seções 9.8 e 9.9.

9.10 Viabilidade econômica e modelos de negócio

A viabilidade de uma cadeia de biocarvão depende de custos e receitas distribuídos por várias etapas. Entre os custos encontram-se coleta, aquisição da biomassa, preparação, secagem, mão de obra, combustível auxiliar, energia, manutenção, análises, licenciamento, armazenamento, transporte, embalagem, aplicação e administração.

O fato de um resíduo não possuir preço de venda não significa que seja gratuito. Sua coleta pode exigir mão de obra, veículos, área de armazenamento e controle de contaminação. Além disso, um material que atualmente não possui mercado pode adquirir valor à medida que aumenta a demanda, modificando os custos do projeto.

Estudos econômicos mostram que matéria-prima, escala, mão de obra, rendimento, transporte e preço do produto exercem forte influência sobre o resultado financeiro (Roberts et al., 2010; Galinato; Yoder; Granatstein, 2011; Sahoo et al., 2019). Por isso, estimativas pontuais devem ser complementadas por análise de sensibilidade. O projeto precisa permanecer compreensível quando rendimento, custo de transporte, preço de venda ou disponibilidade operacional variarem.

A receita pode resultar da venda do biocarvão, de misturas formuladas, da prestação de serviço de tratamento, da energia produzida, da economia obtida pelo gerador ou pelo usuário e, eventualmente, de ativos ambientais. Contudo, receitas potenciais não devem ser somadas sem verificar se podem coexistir. Um coproduto somente gera valor quando atende a requisitos técnicos e possui comprador.

Os modelos de negócio podem ser organizados de diferentes maneiras. Uma agroindústria pode produzir biocarvão para tratar seus próprios resíduos e atender fornecedores rurais. Cooperativas podem compartilhar equipamentos e comercializar produtos padronizados. Empresas especializadas podem prestar serviço de conversão, enquanto organizações públicas ou comunitárias podem operar unidades demonstrativas voltadas à aprendizagem e ao desenvolvimento local.

O modelo escolhido deve definir responsabilidades. Se o gerador entrega a biomassa, o operador realiza a conversão e um terceiro comercializa o produto, torna-se necessário estabelecer quem responde pela qualidade, pelas emissões, pelos lotes rejeitados e pelas reclamações dos usuários. A ausência dessas definições pode transformar uma parceria aparentemente simples em fonte de conflitos.

9.11 Financiamento e distribuição de riscos

Projetos de biocarvão combinam riscos tecnológicos, agronômicos, comerciais e regulatórios. Quando todos são concentrados sobre pequenos produtores ou cooperativas, a possibilidade de abandono aumenta. O financiamento deve acompanhar o estágio de maturidade da iniciativa.

Na fase de pesquisa, recursos não reembolsáveis podem apoiar caracterização, testes de processo e ensaios agronômicos. Na demonstração, podem ser necessários investimentos compartilhados em equipamentos, monitoramento e assistência técnica. O crédito comercial torna-se mais adequado quando a tecnologia, o fornecimento da matéria-prima e a demanda já foram demonstrados.

O componente de financiamento do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia reconhece a necessidade de combinar instrumentos públicos e privados e de ampliar o acesso de empreendimentos da sociobioeconomia a recursos compatíveis com suas características (CNBIO, 2026). Para cadeias de biocarvão, essa orientação pode se traduzir em chamadas de pesquisa, garantias, crédito para equipamentos, assistência técnica e capital de giro.

O apoio público deve estar associado a metas verificáveis. Em vez de financiar apenas a compra do forno, o programa pode vincular desembolsos à instalação segura, ao treinamento, à caracterização dos lotes, à operação durante período mínimo e à demonstração do destino do produto.

A distribuição dos riscos precisa acompanhar a distribuição dos benefícios. Se uma empresa controla tecnologia, certificação e comercialização, enquanto comunidades assumem coleta, fornecimento e risco territorial, existe assimetria. Contratos devem estabelecer preços, volumes, padrões de qualidade, responsabilidades e formas de revisão.

9.12 Mercados de carbono e integridade climática

O biocarvão pode contribuir para a remoção de dióxido de carbono quando a biomassa é obtida de forma sustentável, o carbono permanece armazenado por longo período e as emissões da cadeia não anulam o benefício. Estudos indicam que materiais adequadamente produzidos podem representar formas duráveis de armazenamento de carbono (Woolf et al., 2021; Chiaramonti et al., 2024).

Entretanto, transformar essa função em crédito exige monitoramento, relato e verificação. O projeto precisa definir a linha de base, comprovar adicionalidade, registrar origem e quantidade da biomassa, calcular rendimento, teor de carbono, estabilidade e emissões associadas à coleta, secagem, produção, transporte e aplicação.

A Lei nº 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões e criou as bases para reconhecimento de Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões, sujeitos a metodologias credenciadas (Brasil, 2024b). Isso não significa que qualquer projeto de biocarvão gere automaticamente ativos reconhecidos no sistema. A elegibilidade dependerá da regulamentação, da metodologia aplicável e da capacidade de demonstrar integridade ambiental.

Custos de medição, auditoria, registro e comercialização podem ser elevados para pequenas unidades. O agrupamento de projetos pode reduzir parte desses custos, mas exige padronização, sistema comum de dados e definição clara da responsabilidade por falhas.

Estudo recente sobre transações voluntárias mostrou que compradores atribuem valor a benefícios econômicos e sociais associados aos créditos de biocarvão. Os autores alertam, porém, que esses benefícios precisam ser auditados para evitar alegações sem comprovação (Jokubė et al., 2026).

A viabilidade do empreendimento não deve depender exclusivamente da venda futura de créditos. O cenário financeiro básico deve ser testado sem essa receita ou com valores conservadores. O carbono pode complementar um sistema que já possui utilidade material e territorial, mas não deve ocultar custos, impactos ou ausência de demanda pelo produto.

9.13 Participação social, repartição de benefícios e governança

A participação social precisa ocorrer desde a definição do problema. Consultar os atores somente após a escolha do equipamento reduz a possibilidade de incorporar conhecimentos locais sobre sazonalidade, transporte, usos existentes da biomassa e organização do trabalho.

Produtores, comunidades tradicionais, povos indígenas, cooperativas, agroindústrias, governos locais, instituições de pesquisa e usuários do biocarvão podem possuir interesses distintos. O gerador pode desejar reduzir custos de disposição; o agricultor procura um insumo eficiente; a comunidade pode priorizar trabalho e autonomia; e o órgão ambiental precisa controlar emissões e riscos.

A governança deve explicitar quem decide, quem executa, quem monitora e quem recebe os benefícios. Também precisa oferecer mecanismos de reclamação e revisão. Essa estrutura não necessita ser burocrática, mas deve ser compreensível e documentada.

Quando a iniciativa envolver territórios, recursos ou conhecimentos de povos indígenas e comunidades tradicionais, devem ser observados os direitos aplicáveis, a participação adequada e as salvaguardas do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia. O conhecimento associado às Terras Pretas, por exemplo, não pode ser utilizado apenas como argumento comercial sem reconhecimento de sua origem histórica e cultural.

A repartição de benefícios pode assumir diferentes formas: pagamento justo pela biomassa, participação na propriedade da unidade, remuneração do trabalho, acesso preferencial ao produto, assistência técnica ou divisão das receitas ambientais. A escolha deve resultar de negociação transparente e não de uma decisão externa apresentada como benefício coletivo.

9.14 Pesquisa, extensão, formação e criação de demanda

As lacunas identificadas no Capítulo 8 mostram que a expansão do biocarvão na Amazônia requer programas de pesquisa de longa duração. É necessário ampliar os ensaios de campo, comparar doses economicamente viáveis, acompanhar diferentes solos e culturas e integrar avaliações agronômicas, econômicas e ambientais.

A pesquisa também precisa abordar equipamentos e cadeias operacionais. Rendimento, consumo energético, emissões, disponibilidade mecânica e segurança devem ser avaliados com a biomassa real, e não somente com materiais homogêneos de laboratório.

A extensão rural pode conectar resultados científicos e decisões práticas. Extensionistas devem ser capazes de interpretar análises do solo e do biocarvão, distinguir resultados promissores de recomendações consolidadas e orientar aplicações experimentais. Sem essa mediação, produtos diferentes podem ser utilizados da mesma forma, aumentando o risco de respostas inadequadas.

A formação dos operadores precisa abranger preparação da biomassa, controle térmico, prevenção de incêndios, resfriamento, armazenamento, amostragem, registro de lotes e manutenção. A profissionalização da operação não significa substituir o conhecimento local, mas integrá-lo a procedimentos de segurança e controle.

Compras públicas podem contribuir para criar demanda inicial, pois a Política Nacional de Resíduos Sólidos prevê prioridade para produtos reciclados e soluções compatíveis com padrões sustentáveis. Viveiros, projetos de recuperação de áreas degradadas e unidades de pesquisa podem utilizar produtos regionais, desde que os editais especifiquem qualidade, segurança e desempenho.

A compra pública não deve servir para absorver materiais sem mercado ou qualidade. Seu papel é estabelecer demanda tecnicamente orientada, apoiar demonstrações e produzir dados que possam ser avaliados. O pagamento deve estar relacionado à conformidade do produto e aos resultados esperados (Figura 45).

Figura 45 – Integração entre viabilidade econômica, integridade climática e repartição de benefícios. *A decisão de investimento deve considerar custos de coleta, secagem, conversão, manutenção, análises, licenciamento, transporte e aplicação, além de testar cenários de rendimento, disponibilidade operacional, preço e demanda. O financiamento precisa acompanhar a maturidade da iniciativa e distribuir riscos entre os participantes. Alegações climáticas exigem linha de base, adicionalidade, rastreabilidade, quantificação do carbono, emissões da cadeia e verificação independente; receitas de créditos devem permanecer complementares e conservadoras. Contratos transparentes precisam definir responsabilidades, propriedade, remuneração da biomassa, trabalho, acesso ao produto e repartição dos benefícios.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Roberts et al. (2010), Galinato, Yoder e Granatstein (2011), Sahoo et al. (2019), Woolf et al. (2021), Chiaramonti et al. (2024), CNBio (2026), Jokubė et al. (2026) e nas seções 9.10 a 9.14.

9.15 Tabela comparativo de barreiras e instrumentos

O quadro 9 relaciona as principais barreiras à implementação de cadeias de biocarvão com instrumentos de resposta e evidências necessárias para a tomada de decisão.

Quadro 9 – Barreiras à implementação de cadeias de biocarvão na Amazônia e instrumentos de resposta

Barreira	Manifestação no território	Consequência possível	Instrumentos de resposta	Evidência necessária para avançar
Oferta irregular de biomassa	Sazonalidade, dispersão e competição com outros usos	Ociosidade do equipamento e aumento dos custos	Inventário territorial, contratos de fornecimento e operação modular	Série mensal de geração, fração disponível e custo de coleta
Umidade elevada	Resíduos frescos e armazenamento sob chuva	Maior consumo energético e instabilidade do processo	Secagem solar protegida e aproveitamento do calor da pirólise	Balanço energético e umidade da biomassa na entrada
Transporte oneroso	Grandes distâncias, transbordos e condições variáveis das rotas	Perda de viabilidade e aumento das emissões	Produção próxima à fonte, polos regionais e	Custo e emissões por rota e tonelada transportada

			avaliação de unidades móveis	
Tecnologia inadequada	Equipamento incompatível com a biomassa ou sem controle térmico	Baixo rendimento, emissões e produto heterogêneo	Testes com a biomassa real, instrumentação e treinamento	Rendimento, temperatura, emissões e uniformidade dos lotes
Manutenção limitada	Falta de peças e assistência técnica em municípios distantes	Paralisações prolongadas	Padronização de componentes, estoque mínimo de peças e formação técnica local	Disponibilidade operacional e tempo médio de reparo
Variabilidade do produto	Mudanças na matéria-prima e nas condições do processo	Resposta agronômica imprevisível	Programa de autocontrole, amostragem e rastreabilidade	Laudos dos lotes e limites internos de aceitação
Incerteza regulatória	Ausência de categoria autônoma específica para o biocarvão	Atraso no registro e risco de comercialização irregular	Consulta prévia aos órgãos competentes e definição da finalidade do produto	Parecer de enquadramento e documentação técnica
Licenciamento e emissões	Fornos sem controle adequado de gases e partículas	Impactos ambientais e sanitários e aplicação de sanções	Licenciamento proporcional ao risco e sistemas de combustão dos gases	Monitoramento das emissões e atendimento às condicionantes
Mercado incipiente	Compradores desconhecem o produto ou não reconhecem seu valor	Acúmulo de estoques e receita insuficiente	Unidades demonstrativas, contratos e compras públicas orientadas por critérios técnicos	Demanda contratada e desempenho comprovado na aplicação
Investimento inicial elevado	Necessidade de equipamentos, obras, análises e licenças	Exclusão de pequenos produtores e organizações comunitárias	Cooperativas, financiamento misto e implantação por etapas	Fluxo de caixa, análise de sensibilidade e garantias
Dependência de créditos de carbono	Receita projetada sem metodologia aprovada ou comprador definido	Inviabilidade financeira do empreendimento	Cenário conservador sem créditos e validação do sistema de monitoramento, relato e verificação	Elegibilidade, custo de auditoria e contrato de compra

Baixa capacidade técnica	Escassez de operadores, extensionistas e laboratórios	Acidentes, falhas operacionais e uso inadequado do produto	Formação profissional e organização de uma rede regional de laboratórios	Capacitação dos operadores e plano de assistência técnica
Governança frágil	Responsabilidades, decisões e benefícios indefinidos	Conflitos e abandono da iniciativa	Acordos formais, participação social e prestação de contas	Estrutura decisória, contratos e mecanismo de reclamação
Risco socioambiental	Biomassa ilegal, retirada excessiva ou apropriação desigual dos benefícios	Desmatamento, degradação ambiental e injustiça social	Salvaguardas, rastreabilidade e repartição transparente dos benefícios	Comprovação da origem legal, avaliação territorial e indicadores sociais

Fonte: Elaboração autoral com base em Roberts et al. (2010), Meyer, Glaser e Quicker (2011), Sahoo et al. (2019), Pinsky, Marcovitch e Val (2024), Chiaramonti et al. (2024), Castro et al. (2026) e na legislação brasileira aplicável.

O quadro demonstra que as barreiras são interdependentes. A irregularidade da biomassa afeta a escala, a escala influencia a tecnologia, a tecnologia determina parte da qualidade e das emissões, e a qualidade interfere no acesso ao mercado. Por isso, soluções isoladas raramente são suficientes.

9.16 Rota escalonada de implementação

A implementação responsável pode ser organizada em seis etapas. Cada uma deve produzir informações suficientes para justificar o avanço, a reformulação ou a interrupção da iniciativa.

Etapa 1 — Diagnóstico territorial. Inicialmente, devem ser identificados o problema que se pretende enfrentar, os geradores, os fluxos mensais, os usos existentes, a umidade, a localização e os possíveis usuários do produto. O resultado não deve ser apenas uma estimativa anual, mas um mapa funcional da cadeia.

Etapa 2 — Triagem da matéria-prima e das rotas. Amostras representativas precisam ser caracterizadas e comparadas com alternativas como compostagem, aproveitamento energético, cobertura do solo e uso direto controlado. A pirólise avança quando apresenta correspondência entre o resíduo, a tecnologia e uma função útil.

Etapa 3 — Teste tecnológico e definição do produto. A biomassa deve ser processada em condições controladas, registrando temperatura, tempo, consumo energético, rendimento e emissões. O produto é caracterizado e sua finalidade preliminar é definida sem extrapolar as evidências.

Etapa 4 — Unidade demonstrativa. O sistema é operado por período suficiente para incorporar sazonalidade, manutenção e variação dos lotes. Nessa fase são avaliados custos reais, segurança, disponibilidade operacional, aceitação dos trabalhadores e desempenho do produto em condições próximas do uso.

Etapa 5 — Validação regulatória, comercial e social. O enquadramento do produto e da unidade precisa estar definido, os compradores devem conhecer as especificações e os atores territoriais devem participar da governança. Contratos, responsabilidades e mecanismos de repartição de benefícios são formalizados.

Etapa 6 — Expansão condicionada ao desempenho. A ampliação ocorre gradualmente, com metas e pontos de revisão. Caso a unidade não alcance rendimento, qualidade, segurança ou demanda mínima, o projeto deve ser ajustado antes de novos investimentos.

Essa sequência reduz o risco de transformar um equipamento em objetivo final. A unidade de pirólise é apenas um componente de um sistema que inclui matéria-prima, pessoas, controle, mercado e aplicação.

9.17 Indicadores para acompanhamento

O monitoramento deve combinar indicadores materiais, técnicos, ambientais, econômicos e sociais. Na dimensão material, são importantes a quantidade gerada, a fração coletada, a umidade, o rendimento e o destino de cada produto. Esses dados permitem verificar se a operação corresponde ao inventário inicial.

O desempenho técnico pode ser acompanhado pela disponibilidade operacional, consumo energético, temperatura, rendimento por lote, frequência de manutenção, tempo de reparo e ocorrência de incidentes. A simples massa produzida não revela se o sistema opera com segurança ou uniformidade.

Os indicadores de qualidade devem registrar conformidade dos lotes, variação dos principais parâmetros, presença de contaminantes e adequação ao uso. Quando o produto for aplicado ao solo, devem ser medidos os atributos relacionados à função pretendida, além da resposta das plantas e de possíveis efeitos adversos.

Na dimensão ambiental, o monitoramento precisa considerar emissões da produção, origem da biomassa, consumo de energia, transporte, estabilidade do carbono e impactos sobre solo e água. Quando houver alegação climática, os dados devem atender à metodologia de quantificação utilizada.

Os indicadores econômicos incluem custo por tonelada de resíduo tratado, custo por tonelada de biocarvão, receita, capital de giro, economia de outros insumos, preço de venda,

demanda contratada e período de retorno. A análise deve separar receitas comprovadas de valores esperados ou condicionados.

Na dimensão social, é necessário acompanhar empregos gerados, qualidade e segurança do trabalho, participação nas decisões, distribuição da renda, presença de mulheres e jovens, acesso das comunidades ao produto, conflitos registrados e funcionamento dos mecanismos de reclamação.

Indicadores não devem ser coletados apenas para prestação de contas. Eles precisam orientar decisões. Metas não alcançadas podem indicar necessidade de treinamento, mudança tecnológica, revisão dos contratos ou interrupção da expansão (Figura 46).

Figura 46 – Rota escalonada para implementação e expansão condicionada de cadeias de biocarvão. *A implementação pode avançar por diagnóstico territorial; triagem da matéria-prima e comparação de rotas; teste tecnológico e definição preliminar do produto; operação de unidade demonstrativa; validação regulatória, comercial e social; e expansão gradual condicionada ao desempenho. Cada etapa deve gerar evidências materiais, técnicas, ambientais, econômicas e sociais suficientes para justificar avanço, reformulação ou interrupção. O monitoramento continua após a expansão e utiliza rendimento, disponibilidade operacional, conformidade dos lotes, emissões, custos, demanda, segurança do trabalho, participação e distribuição dos benefícios como critérios de decisão.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Pinsky, Marcovitch e Val (2024), Castro et al. (2026), no Quadro 9.1 e nas seções 9.16 e 9.17.

9.18 Síntese do capítulo

A implementação de cadeias de biocarvão na Amazônia depende de uma arquitetura institucional que conecte gestão de resíduos, bioeconomia, regulação agrícola, licenciamento ambiental, ciência, financiamento e governança territorial.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos oferece princípios para priorização e valorização dos fluxos, enquanto a Estratégia Nacional de Bioeconomia amplia a atenção para conservação, inclusão, inovação e agregação de valor. Esses instrumentos criam oportunidades, mas não substituem a demonstração da viabilidade de cada projeto.

O enquadramento do biocarvão deve ser definido segundo sua composição e finalidade. Produção regular, comercialização e alegações de desempenho dependem de registros, autocontrole, rastreabilidade e análises compatíveis. Padrões voluntários podem contribuir para a confiança, mas não substituem as exigências brasileiras.

As principais barreiras amazônicas envolvem sazonalidade, umidade, transporte, manutenção, capacitação e acesso a laboratórios. Por isso, a escala ótima não será necessariamente a maior. Sistemas descentralizados, polos cooperativos ou unidades fixas próximas aos geradores podem ser adequados conforme a distribuição da biomassa e do mercado.

A viabilidade econômica deve ser analisada com cenários conservadores e sensibilidade às variáveis críticas. Receitas ambientais podem complementar o sistema, mas não devem sustentar projeções sem metodologia, verificação e comprador. Da mesma forma, benefícios sociais precisam ser demonstrados e repartidos, e não apenas mencionados.

A rota escalonada proposta reduz os riscos da expansão prematura. Diagnóstico, triagem, teste, demonstração, validação e ampliação constituem etapas conectadas por evidências. Uma cadeia somente pode ser considerada circular quando reduz impactos, mantém utilidade material, gera benefícios territoriais e opera sob salvaguardas verificáveis.

O próximo capítulo examinará tendências futuras, inovações tecnológicas, novas aplicações, prioridades de pesquisa e recomendações para a consolidação responsável da economia circular baseada em resíduos e biocarvão na Amazônia.

Referências

BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Brasília, DF: Presidência da República, 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/D4954compilado.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Brasília, DF: Presidência da República, 2022a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2022b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia. Brasília, DF: Presidência da República, 2024a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d12044.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Decreto nº 12.858, de 24 de fevereiro de 2026. Altera a regulamentação da inspeção e fiscalização de insumos destinados à agricultura. Brasília, DF: Presidência da República, 2026. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2026/decreto/d12858.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas para a cooperação entre União, estados, Distrito Federal e municípios nas ações administrativas ambientais. Brasília, DF: Presidência da República, 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes e outros insumos destinados à agricultura. Brasília, DF: Presidência da República, 1980. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/l6894.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Brasília, DF: Presidência da República, 2024b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15042.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Brasília, DF: Presidência da República, 2025a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15190.htm. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006. Aprova normas sobre corretivos, inoculantes, biofertilizantes e condicionadores de solo. Brasília, DF: MAPA, 2006. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf/view. Acesso em: 29 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 53, de 23 de outubro de 2013. Estabelece disposições sobre registros de estabelecimentos e produtos destinados à agricultura. Brasília, DF: MAPA, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece regras sobre fertilizantes orgânicos e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, DF: MAPA, 2020.

BROWN, T. R.; WRIGHT, M. M.; BROWN, R. C. Estimating profitability of two biochar production scenarios: slow pyrolysis versus fast pyrolysis. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 1, p. 54–68, 2011. DOI: https://doi.org/10.1002/bbb.254.

CASTRO, D. N.; OLIVEIRA, D. A.; LIMA JÚNIOR, F. B.; SOLIANI, R. D. Integrated framework of logistics and circular economy in bioeconomic value chains in the Amazon: a

systematic review. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 72, p. 67–96, 2026. DOI: https://doi.org/10.38116/ppp72art3.

CHIARAMONTI, D.; LEHMANN, J.; BERRUTI, F.; GIUDICIANNI, P.; SANEI, H.; MAŠEK, O. Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. **Biochar**, v. 6, 81, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7.

CNBIO — COMISSÃO NACIONAL DE BIOECONOMIA. Resolução CNBio nº 8, de 5 de março de 2026. Propõe metas e aprova componentes do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbc/comissao-nacional-de-bioeconomia/resolucoes-da-cnbio. Acesso em: 29 ago. 2026.

CONAMA — CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Brasília, DF: Conama, 2006. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=510&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 29 ago. 2026.

EBC — EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE. **European Biochar Certificate: guidelines for a sustainable production of biochar**. Arbaz: Carbon Standards International, 2025. Disponível em: https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents. Acesso em: 29 ago. 2026.

GALINATO, S. P.; YODER, J. K.; GRANATSTEIN, D. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6344–6350, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.035.

JOKUBĖ, M. et al. Biochar co-benefits are valued in the voluntary carbon market. **Communications Sustainability**, v. 1, 90, 2026. DOI: https://doi.org/10.1038/s44458-026-00096-w.

MEYER, S.; GLASER, B.; QUICKER, P. Technical, economical, and climate-related aspects of biochar production technologies: a literature review. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 22, p. 9473–9483, 2011. DOI: https://doi.org/10.1021/es201792c.

PINSKY, V. C.; MARCOVITCH, J.; VAL, A. L. Experimentalist governance in bioeconomy: insights from the Brazilian Amazon. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 28, n. 6, e240170, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2024240170.en.

ROBERTS, K. G.; GLOY, B. A.; JOSEPH, S.; SCOTT, N. R.; LEHMANN, J. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 827–833, 2010. DOI: https://doi.org/10.1021/es902266r.

SAHOO, K.; BILEK, E.; BERGMAN, R.; MANI, S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. **Applied Energy**, v. 235, p. 578–590, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.076.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, 56, 2010. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms1053.

WOOLF, D.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; KISHIMOTO-MO, A. W.; MCCONKEY, B.; BALDOCK, J. Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 21, p. 14795–14805, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425

CAPÍTULO 10

FUTURO DO BIOCARVÃO NA AMAZÔNIA: INOVAÇÃO, PRIORIDADES DE PESQUISA E RECOMENDAÇÕES PARA CONSOLIDAÇÃO REGIONAL

Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Kalwan Maciel Martins de Jesus
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Bruno Kleidson da Silva Maia
Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Pedro Lucas Magno Bulhões
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Wanderson Vinícius Assis Ferreira
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Maria Luiza Ferreira Leal
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Evelyn Suzana Bouth Lopes
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Maria Luiza Godinho da Rocha
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Victoria Deceles Pinheiro de Menezes
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Silvia Letícia da Costa Azevedo
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

DOI: 10.52832/wed.222.1297

O futuro do biocarvão na Amazônia dependerá menos da expansão indiscriminada de sua produção e mais da capacidade de desenvolver materiais seguros, específicos para cada função e integrados a cadeias territoriais sustentáveis. Este capítulo reúne tendências científicas e tecnológicas, define prioridades de pesquisa e apresenta recomendações para consolidar a transformação responsável de resíduos amazônicos em produtos, serviços ambientais e oportunidades de desenvolvimento regional.

10.1 Da economia circular à inovação orientada pelo território

Os capítulos anteriores construíram uma sequência que começou nos fundamentos da economia circular e avançou pela compreensão do território amazônico, identificação dos resíduos, diferenciação dos materiais carbonosos, tecnologias de produção, controle de qualidade, aplicações agrícolas, estudos de caso e condições institucionais de implementação.

Essa trajetória demonstra que o biocarvão não representa uma solução isolada. Ele constitui um componente potencial de sistemas que conectam geração de resíduos, conversão tecnológica, aproveitamento energético, manejo do solo, recuperação ambiental, mitigação climática e desenvolvimento territorial.

O desafio futuro consiste em transformar essa integração conceitual em cadeias verificáveis. Isso significa abandonar a ideia de que todos os resíduos precisam ser submetidos à mesma tecnologia ou de que um único tipo de biocarvão atenderá a diferentes necessidades. A inovação mais relevante será aquela capaz de relacionar um fluxo residual específico, uma tecnologia compatível, um produto caracterizado e uma demanda territorial demonstrada.

A literatura científica confirma que as respostas do solo e das plantas dependem da matéria-prima, das condições de produção, da dose, do tipo de solo, da cultura e da interação com outros insumos. Joseph et al. demonstram que os mecanismos de atuação do biocarvão variam entre os sistemas e que resultados positivos não podem ser generalizados sem a compreensão das condições que os produziram (Joseph et al., 2021).

Na Amazônia, essa variabilidade é ampliada pela diversidade de solos, cadeias produtivas, regimes hídricos e formas de ocupação. A formulação de estratégias regionais deve reconhecer que várzeas, terras firmes, áreas periurbanas, agroindústrias, comunidades ribeirinhas, assentamentos, sistemas agroflorestais e áreas degradadas apresentam problemas e capacidades distintas.

10.2 Biocarvões desenvolvidos para funções específicas

Uma das principais tendências científicas é a passagem do biocarvão genérico para materiais orientados por função. Em vez de produzir primeiro e buscar uma aplicação posteriormente, a cadeia passa a ser planejada a partir do problema que se pretende enfrentar.

Se a finalidade for diminuir a acidez do solo, o produto precisará apresentar alcalinidade suficiente, composição segura e comportamento comparável às alternativas existentes. Quando o objetivo for melhorar um substrato, características como densidade, porosidade, granulometria, estabilidade física, pH e condutividade elétrica tornam-se determinantes. Para retenção de nutrientes, serão relevantes a química superficial, a capacidade de troca e a interação com o fertilizante. Na remediação de áreas contaminadas, a prioridade será demonstrar redução da mobilidade, da bioacessibilidade e da toxicidade dos elementos.

Essa abordagem pode ser denominada desenvolvimento orientado pelo uso. Ela começa com o diagnóstico da limitação, prossegue com a definição das propriedades necessárias e somente então seleciona matéria-prima e condições de conversão. O processo pode resultar em produtos diferentes mesmo quando o resíduo utilizado é o mesmo.

O caroço de açaí, por exemplo, pode gerar biocarvões com propriedades distintas conforme a temperatura, o tempo de residência e o tratamento posterior. Sato et al. demonstraram que essas condições alteram rendimento e atributos do produto, confirmando a possibilidade de ajustar o processo às funções pretendidas (SATO et al., 2019).

A produção orientada pelo uso não significa que todas as propriedades possam ser controladas com precisão. A variabilidade biológica da biomassa permanece, e mudanças no local de origem, umidade, maturidade e contaminação modificam os resultados. Por isso, o desenvolvimento do produto precisa ser acompanhado por limites de aceitação e controle dos lotes.

Essa mudança também favorece a honestidade científica. Um produto formulado para elevar o pH não precisa ser anunciado como solução simultânea para retenção de água, fornecimento completo de nutrientes, aumento da produtividade e remoção de carbono. Quanto mais específica for a função, mais clara poderá ser a evidência necessária para demonstrá-la (Figura 47).

Figura 47 – Desenvolvimento do biocarvão orientado pela função e pela demanda territorial. *O desenvolvimento orientado pelo uso começa com o diagnóstico de uma limitação concreta, define as propriedades necessárias ao material e somente depois seleciona matéria-prima, condições de conversão e tratamentos posteriores. A caracterização físico-química, o controle entre lotes e a validação na aplicação pretendida conectam o problema inicial ao produto final. Essa abordagem evita atribuir funções universais a materiais distintos e permite formular biocarvões específicos para correção da acidez, retenção de nutrientes, composição de substratos ou remediação ambiental.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Joseph et al. (2021), Sato et al. (2019) e nas seções 10.1 e 10.2.

10.3 Pirólise modular, descentralização e integração em biorrefinarias

O desenvolvimento de equipamentos modulares representa uma possibilidade relevante para territórios onde os resíduos estão distribuídos em volumes médios ou apresentam forte sazonalidade. A modularidade permite ajustar a capacidade por meio da adição de unidades, reduzir o risco associado a grandes investimentos iniciais e manter parte do processamento próxima à fonte.

A descentralização, entretanto, não deve ser utilizada como justificativa para equipamentos sem controle. Unidades modulares precisam registrar temperatura, tempo de residência, rendimento, consumo de energia e condições de combustão. Também devem possuir mecanismos de segurança, controle dos gases e procedimentos de manutenção.

Em agroindústrias com geração concentrada, a pirólise pode ser integrada a sistemas de aproveitamento energético. Os gases e vapores produzidos podem fornecer parte do calor necessário à secagem da biomassa ou a outros processos, reduzindo a dependência de combustíveis externos. A viabilidade depende da composição dos coprodutos, da estabilidade da operação e da existência de demanda térmica compatível.

A integração em biorrefinarias amplia a lógica da circularidade. Antes da carbonização, podem ser recuperados compostos de maior valor, quando tecnicamente viável. A fração sólida

remanescente pode seguir para conversão térmica, enquanto calor e coprodutos são aproveitados no próprio sistema. Essa utilização em cascata evita direcionar integralmente uma biomassa para uma aplicação de menor valor quando existem rotas complementares.

Resíduos muito úmidos apresentam desafios específicos para a pirólise, pois a evaporação da água aumenta a demanda energética. Processos como a carbonização hidrotérmica podem ser investigados para determinadas biomassas úmidas. Entretanto, o material resultante, denominado hidrocarvão, possui propriedades e rotas de formação diferentes das do biocarvão produzido por pirólise. Sua segurança, estabilidade e utilização precisam ser avaliadas separadamente.

O modelo tecnológico mais adequado não será necessariamente o mais moderno ou automatizado. Em municípios distantes dos centros de manutenção, reparabilidade, disponibilidade de peças e capacidade técnica local podem ser mais importantes que o elevado nível de sofisticação. A inovação deve aumentar a confiabilidade do sistema e não criar nova dependência tecnológica.

10.4 Eficiência energética e controle ambiental do processo

A produção futura de biocarvão deve avançar na integração entre rendimento material, qualidade do produto, eficiência energética e controle das emissões. Maximizar apenas a massa de biocarvão pode resultar em material insuficientemente carbonizado. Priorizar somente temperaturas elevadas pode reduzir excessivamente o rendimento e aumentar o consumo de energia.

O ponto operacional precisa ser definido pela função do produto e pelo balanço do sistema. Sensores de temperatura, pressão, oxigênio e composição dos gases podem melhorar o controle, desde que sejam compatíveis com a escala e possam ser mantidos pelos operadores.

O aproveitamento dos gases da pirólise possui importância energética e ambiental. A combustão controlada pode fornecer calor e reduzir a liberação de compostos resultantes da conversão incompleta. Em contraste, a emissão direta de fumaça transfere parte do impacto do resíduo para a atmosfera e compromete a classificação do processo como alternativa sustentável.

A secagem merece atenção especial na Amazônia. Chuvas frequentes e umidade atmosférica elevada podem dificultar o preparo da biomassa. Sistemas de secagem solar protegida, armazenamento ventilado e recuperação de calor podem melhorar a eficiência. Contudo, a área necessária, o tempo de secagem e o risco de degradação do material precisam ser incluídos no dimensionamento.

A avaliação de ciclo de vida deverá orientar as decisões futuras, comparando origem da biomassa, consumo energético, emissões da produção, aproveitamento dos coprodutos, transporte

e destino final do carbono. Roberts et al. mostraram que os resultados climáticos e econômicos podem variar substancialmente conforme a matéria-prima e o desenho do sistema (Roberts et al., 2010).

Assim, um sistema que produza biocarvão estável, mas dependa de longos transportes e elevada quantidade de combustível externo, pode apresentar desempenho inferior ao de uma rota territorialmente integrada. A avaliação precisa abranger a cadeia e não apenas o reator (Figura 48).

Figura 48 – Pirólise modular integrada à secagem, recuperação de calor e controle ambiental. *Unidades modulares podem ajustar a capacidade às variações territoriais e reduzir o risco de grandes investimentos iniciais, desde que registrem as condições de operação e mantenham sistemas de segurança, tratamento dos gases e manutenção. Em ambientes amazônicos úmidos, a secagem solar protegida, o armazenamento ventilado e a recuperação do calor dos gases podem reduzir a demanda por combustíveis externos. A sustentabilidade depende do balanço entre rendimento, qualidade do produto, consumo energético, emissões, transporte, reparabilidade e aproveitamento dos coprodutos.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Sato et al. (2019, 2020), Roberts et al. (2010) e nas seções 10.3 e 10.4.

10.5 Biocarvões enriquecidos, formulados e modificados

Outra tendência é o desenvolvimento de biocarvões enriquecidos com nutrientes ou combinados com compostos, fertilizantes e materiais minerais. Essas formulações buscam superar uma limitação recorrente: muitos biocarvões apresentam superfícies capazes de reter nutrientes, mas fornecem quantidades insuficientes para atender à demanda das culturas.

O enriquecimento pode ocorrer antes, durante ou depois da conversão. O produto pode ser misturado com composto, esterco tratado, fertilizante mineral ou solução nutritiva. Também pode ser utilizado durante a compostagem, passando por interações com matéria orgânica, nutrientes e microrganismos.

Fertilizantes baseados em biocarvão vêm sendo estudados como veículos para liberação mais controlada de nutrientes. Wang et al. destacam que essas formulações podem combinar a

função do material carbonoso com o fornecimento de nutrientes, mas o desempenho depende do método de fabricação, da ligação entre o nutriente e a superfície e das condições do solo (Wang et al., 2022).

Para os solos amazônicos, formulações contendo fósforo merecem investigação devido à elevada capacidade de adsorção desse nutriente em muitos solos altamente intemperizados. Entretanto, a retenção não pode ser tão intensa a ponto de reduzir a disponibilidade para as plantas. Os estudos devem avaliar liberação, absorção, eficiência agronômica e efeito residual.

A associação com compostos orgânicos também é promissora. O composto fornece nutrientes e carbono mais facilmente degradável, enquanto o biocarvão pode contribuir para retenção, estrutura e armazenamento de carbono mais persistente. Os resultados dos experimentos da Amazônia Central discutidos no Capítulo 8 demonstraram que as combinações frequentemente apresentam desempenho superior ao carvão aplicado isoladamente.

Biocarvões modificados física ou quimicamente também vêm sendo estudados para adsorção de contaminantes. As modificações podem aumentar área superficial ou introduzir grupos funcionais, mas também podem adicionar reagentes, aumentar custos e produzir novos riscos. Meta-análise sobre imobilização de cádmio mostrou que os efeitos dos materiais modificados variam conforme matéria-prima, método de modificação e condições de aplicação, e que nem todas as combinações reduzem o teor do elemento nas plantas (Liu et al., 2024).

Na Amazônia, a prioridade deve ser dada a formulações que utilizem materiais seguros, disponíveis regionalmente e compatíveis com a capacidade de controle. A modificação somente será justificável quando oferecer benefício demonstrado em comparação com o biocarvão não modificado.

10.6 Substratos, viveiros e aplicações localizadas

As aplicações localizadas podem representar uma das rotas mais viáveis para o biocarvão amazônico. Em viveiros, recipientes, covas e faixas de plantio, quantidades menores de produto podem ser aplicadas diretamente à zona de crescimento das raízes. Isso reduz a demanda total de biomassa e os custos de transporte e distribuição em comparação com aplicações em área total.

O uso em substratos permite explorar baixa densidade, porosidade e capacidade de retenção, além da possibilidade de substituir parcialmente componentes extraídos de recursos não renováveis ou transportados por grandes distâncias. Contudo, os efeitos dependem da proporção incorporada e da interação com os demais componentes.

Revisão de Natalli et al. mostrou que o uso de biocarvão em substratos hortícolas e florestais apresenta potencial, mas exige ajuste às características do material, às espécies e ao manejo nutricional (Natalli et al., 2024).

Evidência recente produzida na Amazônia avaliou biocarvão de casca de castanha-do-brasil em substrato para mudas de açaí-solteiro (*Euterpe precatoria*). Proporções intermediárias, entre 20% e 30% em volume, combinadas com adubação convencional, apresentaram o desempenho mais equilibrado nas condições experimentais. Proporções maiores não produziram benefício progressivo, confirmando a necessidade de definir faixas adequadas para cada combinação (Rufino et al., 2026).

Viveiros de espécies florestais, frutíferas e agroflorestais podem funcionar como espaços de validação. Eles possibilitam testar formulações, acompanhar a qualidade das mudas e avaliar o desempenho após o plantio. Contudo, uma resposta positiva no recipiente não garante sobrevivência ou crescimento em campo, tornando necessário acompanhar a fase posterior.

Aplicações em covas de culturas perenes, sistemas agroflorestais e restauração também podem reduzir a quantidade necessária. A dose deve ser calculada pelo volume efetivamente tratado, evitando conversões inadequadas entre percentuais utilizados em vasos e toneladas por hectare (Figura 49).

Figura 49 – Formulação de biocarvões e aplicação localizada na zona radicular. *A combinação do biocarvão com composto, fertilizantes ou soluções nutritivas pode reunir retenção, fornecimento de nutrientes e armazenamento de carbono mais persistente. O esquema compara um substrato convencional, uma formulação equilibrada e uma condição com participação excessiva de material carbonoso, destacando que o aumento da proporção não produz necessariamente benefício progressivo. Viveiros, recipientes, covas e faixas de plantio concentram o produto na zona explorada pelas raízes, reduzindo a quantidade total necessária e permitindo ajuste específico à espécie e ao manejo nutricional.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Wang et al. (2022), Liu et al. (2024), Natalli et al. (2024), Rufino et al. (2026) e nas seções 10.5 e 10.6.

10.7 Recuperação de áreas degradadas e remediação ambiental

A recuperação de áreas degradadas constitui outra frente de pesquisa relevante. Biocarvões podem modificar acidez, disponibilidade de nutrientes, estrutura, água e mobilidade de contaminantes. Essas funções são potencialmente úteis em áreas mineradas, solos compactados, substratos empobrecidos e locais com baixa capacidade de estabelecimento da vegetação.

Entretanto, a recuperação não deve ser reduzida à aplicação de um insumo. Relevo, drenagem, erosão, compactação, profundidade do solo, cobertura vegetal e fontes de contaminação precisam ser tratados de maneira integrada. O biocarvão pode contribuir para determinadas funções, mas não substitui o planejamento da restauração.

Nos solos contaminados, a diferença entre imobilização e remoção precisa permanecer clara. O biocarvão pode reduzir a fração móvel de um elemento, mas o contaminante continua presente. Mudanças futuras de pH, drenagem ou condições de oxirredução podem alterar novamente sua mobilidade.

A utilização de espécies florestais associadas a biocarvões representa uma linha promissora, especialmente quando busca estabilização do solo, cobertura, formação de matéria orgânica e restauração de funções ecológicas. Os estudos com mogno-brasileiro e ucuúba apresentados no Capítulo 8 constituem evidências experimentais iniciais, mas as doses elevadas e o uso de vasos limitam a transferência direta.

Os experimentos futuros deverão acompanhar sobrevivência, crescimento, distribuição dos contaminantes na planta, estabilidade da imobilização, qualidade da água e destino da biomassa vegetal. Também será necessário comparar o biocarvão com corretivos, compostos, materiais minerais e combinações entre técnicas.

A decisão deve seguir uma avaliação de risco. Materiais destinados à remediação precisam ser caracterizados quanto a contaminantes, estabilidade e possíveis efeitos ecotoxicológicos. A elevada capacidade de adsorção observada em laboratório não é suficiente para autorizar aplicação em larga escala.

10.8 Aplicações além do solo

Embora a agricultura represente a aplicação mais discutida neste livro, o biocarvão também vem sendo investigado em tratamento de água, adsorção, materiais de construção, compostagem e sistemas de bioenergia. Essas alternativas podem ampliar o mercado e permitir que diferentes frações do produto sejam destinadas conforme suas propriedades.

Na filtragem de água, materiais carbonosos podem adsorver determinados compostos, mas o biocarvão bruto não deve ser considerado equivalente ao carvão ativado. Área superficial,

química dos poros, contaminantes e capacidade de regeneração precisam ser avaliadas. Depois da utilização, o material saturado deve receber destinação compatível com as substâncias retidas.

A incorporação em materiais cimentícios representa uma frente emergente. Pesquisas analisam pequenas proporções de biocarvão em argamassas e concretos, buscando reduzir densidade, modificar propriedades térmicas e armazenar carbono. Revisão de Ye et al. mostra resultados promissores, mas destaca que matéria-prima, granulometria, teor incorporado e compatibilidade com a matriz cimentícia controlam o desempenho (Ye et al., 2025).

Para a Amazônia, essas aplicações exigiriam parceria entre pesquisadores de materiais, engenheiros, produtores de biocarvão e setor da construção. Não se deve presumir que um produto agrícola seja adequado ao concreto ou que um material preparado para adsorção possa ser posteriormente aplicado ao solo.

A diversificação dos usos pode favorecer o aproveitamento de diferentes lotes. Materiais que não atendem às especificações agrícolas não devem, entretanto, ser destinados automaticamente a outra aplicação. Cada uso possui requisitos próprios, e a mudança de destino precisa ser tecnicamente validada.

10.9 Digitalização, sensores e aprendizado de máquina

A digitalização pode melhorar o controle dos processos e a rastreabilidade. Registros eletrônicos podem relacionar origem da biomassa, condições de produção, análises, destino e desempenho dos lotes. Essa integração facilita a identificação das causas de variação e apoia programas de autocontrole.

Sensores de baixo custo podem registrar temperatura e duração dos ciclos. Sistemas mais avançados podem monitorar gases, consumo energético e alimentação do reator. O valor da instrumentação depende da confiabilidade dos dados, da calibração e da capacidade de utilizar as informações na tomada de decisão.

Métodos espectroscópicos e sensores proximais apresentam potencial para triagem rápida de biomassas e biocarvões. Espectros podem ser relacionados a carbono, cinzas, grupos funcionais e outras propriedades, desde que os modelos sejam construídos com conjuntos representativos e validados por análises laboratoriais.

O aprendizado de máquina vem sendo utilizado para prever rendimento e propriedades a partir das características da biomassa e das condições de processamento. Yuan et al. desenvolveram modelos para conversão de biomassa aquática e demonstraram elevada capacidade de previsão dentro das condições avaliadas (Yuan et al., 2024).

Apesar do potencial, modelos não substituem experimentos. Um algoritmo treinado com biomassas de outras regiões pode não representar caroço de açaí, casca de castanha-do-brasil ou misturas amazônicas. Dados insuficientes, ausência de condições extremas e diferenças entre laboratórios podem produzir previsões aparentemente precisas, mas inadequadas para novos materiais.

A construção de uma base regional de dados seria estratégica. Ela poderia reunir origem, composição, processo, propriedades e resultados agronômicos dos biocarvões amazônicos. Para ser útil, precisaria adotar métodos comparáveis, unidades padronizadas, metadados completos e regras de acesso.

Quando os dados envolverem comunidades, conhecimentos tradicionais ou recursos territoriais, sua governança precisa reconhecer autoria, consentimento, direitos e condições de compartilhamento. A digitalização não pode transformar informações coletivas em ativos externos sem participação e repartição de benefícios.

10.10 Remoção de carbono e monitoramento de longo prazo

O armazenamento de carbono constitui uma das funções mais discutidas do biocarvão. A conversão térmica transforma parte do carbono da biomassa em estruturas mais persistentes, reduzindo a velocidade de retorno à atmosfera. Contudo, o benefício climático líquido depende da cadeia completa.

A literatura apresenta estimativas diferentes para o potencial global do biocarvão, porque os estudos utilizam pressupostos distintos sobre disponibilidade da biomassa, cenários de referência, tecnologias, estabilidade e usos do solo. Weng e Cowie destacam que, embora exista evidência de potencial relevante, novas avaliações devem empregar informações atualizadas e explicitar as diferenças metodológicas (Weng; Cowie, 2025).

Essa cautela é especialmente importante na Amazônia. Não é aceitável estimar remoção de carbono supondo disponibilidade ilimitada de biomassa florestal ou utilizando resíduos que já mantêm nutrientes, protegem o solo ou sustentam atividades locais. Somente a fração sustentável e adicional pode integrar a contabilização.

O monitoramento deverá registrar biomassa, umidade, rendimento, carbono do produto, estabilidade, consumo energético, emissões, transporte e destino. A permanência também depende da aplicação. Perdas por poeira, erosão, combustão ou destinação inadequada reduzem o armazenamento efetivo.

Biswal e Balasubramanian ressaltam que a ampliação da aplicação em solos precisa ser acompanhada por experimentos de campo de longo prazo, avaliação de ciclo de vida e

padronização dos métodos de contabilização (Biswal; Balasubramanian, 2025). Chiaramonti et al. também defendem que a permanência do carbono deve ser sustentada por evidências e métodos transparentes (Chiaramonti et al., 2024).

A geração de créditos não deve anteceder a capacidade de medir o sistema. Para pequenos produtores e comunidades, modelos agrupados de monitoramento podem reduzir custos, mas precisam garantir que as informações de cada unidade permaneçam rastreáveis (Figura 50).

Figura 50 – Digitalização, rastreabilidade e monitoramento de longo prazo das cadeias de biocarvão. *Registros eletrônicos podem relacionar origem da biomassa, sensores do processo, análises laboratoriais, identidade dos lotes, destino e desempenho em campo. Espectroscopia, sensores proximais e aprendizado de máquina podem apoiar triagem e previsão, mas exigem calibração com conjuntos regionais representativos e validação por métodos laboratoriais e experimentos. A contabilização climática deve acompanhar umidade, rendimento, carbono do produto, estabilidade, energia, emissões, transporte, aplicação e permanência, mantendo cada unidade produtiva identificável mesmo em sistemas agrupados.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Yuan et al. (2024), Woolf et al. (2021), Chiaramonti et al. (2024), Weng e Cowie (2025), Biswal e Balasubramanian (2025) e nas seções 10.9 e 10.10.

10.11 Agenda prioritária de pesquisa para a Amazônia

A produção científica regional avançou na caracterização de resíduos e nos ensaios com plantas, mas ainda existem lacunas entre demonstração experimental e recomendação territorial. O Quadro 10.1 reúne prioridades para orientar pesquisas, programas de inovação e políticas de financiamento.

A agenda não deve ser executada somente por projetos isolados. Estudos realizados com métodos incompatíveis e sem compartilhamento de dados produzem resultados difíceis de comparar. Redes regionais podem estabelecer protocolos mínimos, distribuir experimentos entre diferentes ambientes e formar uma base de evidências mais representativa.

Universidades, institutos federais, Embrapa, órgãos estaduais, laboratórios privados, cooperativas e organizações comunitárias podem atuar de forma complementar. A diversidade institucional é importante porque as perguntas abrangem ciência do solo, engenharia, economia, saúde ocupacional, ecologia, políticas públicas e direitos territoriais.

10.12 Ecossistemas de inovação e bioeconomia ética

A inovação territorial exige relações duradouras entre pesquisa, produtores, empresas, comunidades e poder público. Projetos de curta duração podem gerar equipamentos e artigos científicos, mas não necessariamente constroem capacidade local para operação, manutenção e comercialização.

As unidades demonstrativas devem ser concebidas como ambientes de aprendizagem. Além de produzir biocarvão, elas podem formar operadores, testar métodos de amostragem, receber agricultores, registrar custos e produzir informações para o licenciamento e o mercado.

A propriedade intelectual também precisa ser discutida. Tecnologias desenvolvidas com matérias-primas, conhecimentos ou participação de comunidades não devem ser apropriadas sem regras de reconhecimento e repartição. A inovação pode incluir coautoria, copropriedade, licenciamento social, capacitação e retorno de parte das receitas para os territórios.

Astolfi et al. argumentam que uma bioeconomia ética precisa estabelecer parcerias com povos indígenas e comunidades locais, reconhecendo consentimento, participação e repartição de benefícios como elementos centrais, e não acessórios (Astolfi et al., 2025).

Esse princípio é particularmente relevante em um livro que reconhece as Terras Pretas como referência histórica. A inovação contemporânea não deve apagar a origem cultural dos conhecimentos que ajudaram a demonstrar a possibilidade de enriquecimento duradouro dos solos amazônicos.

A formação de empresas e cooperativas regionais pode ampliar o valor retido no território. Para isso, serão necessários assistência técnica, acesso a laboratórios, crédito, compras responsáveis e mercados que reconheçam qualidade. A política de inovação deve financiar não apenas equipamentos, mas também pessoas, organização, segurança e acompanhamento.

10.13 Estratégia de consolidação até 2035

A consolidação das cadeias de biocarvão pode ser organizada em três horizontes complementares. No curto prazo, a prioridade deve ser padronizar métodos, mapear resíduos, formar operadores, definir o enquadramento regulatório e instalar unidades demonstrativas com monitoramento completo.

No médio prazo, os produtos que apresentarem segurança e desempenho poderão avançar para validações em campo, registro, formulação e comercialização regional. Redes de laboratórios e bancos de dados devem permitir comparação entre matérias-primas, equipamentos e aplicações.

No horizonte mais longo, cadeias consolidadas poderão integrar gestão de resíduos, energia, insumos agrícolas, restauração e remoção de carbono. Essa expansão deverá ocorrer somente quando a origem da biomassa, a qualidade, o balanço ambiental, a viabilidade e a distribuição dos benefícios estiverem demonstrados.

O ano de 2035 é relevante porque o Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia utiliza esse horizonte em seus componentes de planejamento. As iniciativas de biocarvão podem contribuir para suas metas quando promovem valorização de resíduos, desenvolvimento tecnológico, trabalho digno, conservação e descarbonização.

A contribuição não deve ser medida apenas por toneladas produzidas. Indicadores devem avaliar resíduos desviados de destinações inadequadas, emissões evitadas, carbono armazenado, nutrientes recuperados, qualidade do solo, renda territorial, segurança dos trabalhadores e participação social.

A expansão também precisa preservar alternativas. Caso a compostagem, o uso energético direto ou outra rota apresente melhor desempenho para determinado fluxo, a política circular deve favorecer essa escolha. O objetivo não é ampliar o biocarvão como fim em si mesmo, mas melhorar o funcionamento ambiental, produtivo e social dos territórios.

10.14 Recomendações para a consolidação regional

A primeira recomendação é adotar o princípio da adequação à finalidade. Nenhum biocarvão deve ser recomendado sem que suas propriedades estejam relacionadas a uma limitação real do solo, da cultura, do substrato ou da área degradada.

A segunda é tratar a caracterização como parte da produção. Matéria-prima, processo e produto precisam ser documentados. O controle de qualidade não pode começar somente quando surge um problema ou quando o comprador solicita um laudo.

A terceira recomendação é priorizar aplicações localizadas e formulações. Viveiros, covas, faixas de plantio e combinações com compostos ou fertilizantes podem oferecer melhor relação entre quantidade utilizada e função alcançada do que aplicações generalizadas em grandes áreas.

A quarta é implantar as unidades de forma escalonada. Diagnóstico, teste, demonstração, validação e expansão devem permanecer como etapas distintas. O avanço depende de evidências e não apenas da disponibilidade de financiamento.

A quinta é incluir emissões e segurança entre os critérios de desempenho. Um forno que produz bom rendimento, mas expõe trabalhadores ou libera fumaça de forma descontrolada, não constitui tecnologia adequada.

A sexta recomendação é construir capacidade regional. Operadores, técnicos, extensionistas, laboratórios e fabricantes locais de equipamentos são necessários para evitar que a cadeia dependa permanentemente de serviços externos.

A sétima é utilizar avaliações econômicas e ambientais integradas. Custos de coleta, secagem, manutenção, análise e transporte precisam ser incluídos. Benefícios climáticos devem ser calculados pelo ciclo de vida e não apenas pelo carbono contido no produto.

A oitava recomendação é estabelecer governança transparente da biomassa. Origem, disponibilidade, usos concorrentes e direitos territoriais precisam ser respeitados. O aumento da demanda não pode estimular retirada predatória ou conversão de vegetação.

A nona é reconhecer resultados nulos e negativos como parte da aprendizagem. Estudos que não encontram aumento de produtividade ou retenção de água ajudam a definir os limites de utilização e evitam investimentos inadequados.

A décima recomendação é assegurar participação e repartição dos benefícios. Comunidades e produtores não devem atuar somente como fornecedores de resíduos ou mão de obra. Sua participação nas decisões, na propriedade, no conhecimento e nos resultados econômicos é parte da sustentabilidade da cadeia (Figura 51).

Figura 51 – Ecossistema territorial de inovação e consolidação regional das cadeias de biocarvão até 2035. *A consolidação pode avançar de unidades demonstrativas, formação de operadores e padronização de métodos para validações em campo, redes de laboratórios, formulação de produtos e mercados regionais. Em horizonte mais longo, cadeias verificadas podem integrar gestão de resíduos, energia, viveiros, agricultura, restauração, materiais e remoção de carbono. A expansão deve permanecer condicionada à origem sustentável da biomassa, à qualidade, à segurança, ao desempenho ambiental e econômico, à participação das comunidades e à repartição dos benefícios, mantendo conhecimento, processamento e trabalho qualificado no território.*



Fonte: Concepção e ilustração original dos autores, com apoio de inteligência artificial generativa (2026), com base em Pinsky, Marcovitch e Val (2024), Astolfi et al. (2025), no Quadro 10.1 e nas seções 10.11 a 10.14.

10.15 Considerações finais

A economia circular oferece uma estrutura para repensar a relação entre produção, consumo e descarte na Amazônia. Entretanto, a circularidade não surge apenas porque um resíduo é transformado em produto. Ela depende da redução dos impactos, da preservação do valor dos materiais, da segurança dos processos e da distribuição justa dos benefícios.

O biocarvão apresenta potencial para participar dessa transformação. Resíduos de açaí, castanha-do-brasil, madeira e outras biomassas regionais podem gerar materiais com propriedades agrícolas, ambientais e climáticas. Os estudos analisados neste livro demonstram efeitos sobre acidez, nutrientes, porosidade, desenvolvimento de plantas e mobilidade de contaminantes.

Esses resultados não sustentam uma recomendação universal. A resposta depende da origem, da produção, da dose, do solo, da cultura e da associação com outros insumos. Em alguns sistemas, o principal benefício pode ser químico; em outros, físico, ambiental ou climático. Também existem situações nas quais outra rota será mais adequada.

O desenvolvimento responsável requer uma cadeia de evidências. A biomassa precisa ser inventariada, o processo controlado, o produto caracterizado, a aplicação testada e os impactos acompanhados. Somente depois dessa sequência uma experiência promissora pode ser apresentada como solução regional.

A Amazônia não deve ocupar apenas a posição de fornecedora de resíduos ou carbono. O conhecimento, o processamento, os laboratórios, as empresas, os empregos e os mecanismos de decisão precisam estar presentes no território. Ciência e tecnologia devem dialogar com conhecimentos locais, diversidade cultural e direitos coletivos.

A principal perspectiva não é a produção de grandes quantidades de um material indiferenciado. É a construção de sistemas capazes de transformar problemas residuais específicos em produtos úteis, seguros e rastreáveis, mantendo nutrientes e carbono em ciclos territorialmente responsáveis.

Dessa forma, o biocarvão poderá contribuir para a fertilidade dos solos, a produção de mudas, a restauração de áreas, a redução do descarte e a mitigação climática. Sua relevância dependerá da capacidade de unir conhecimento científico, prudência tecnológica, viabilidade econômica, governança pública e justiça social.

O futuro da economia circular na Amazônia será definido não apenas pelo que se consegue transformar, mas pela maneira como essa transformação respeita o território, conserva a floresta e melhora as condições de vida de seus povos.

Referências

ASTOLFI, M. C. T.; FLORES, W.; PEREZ, R.; ESPINOZA, U. J.; ZIMRING, T. B.; KEASLING, J. D.; FOX, K. et al. Partnerships with Indigenous Peoples for an ethical bioeconomy. **Nature Communications**, v. 16, 3010, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-025-57935-y.

BISWAL, B. K.; BALASUBRAMANIAN, R. Use of biomass-derived biochar as a sustainable material for carbon sequestration in soil: recent advancements and future perspectives. **npj Materials Sustainability**, v. 3, 26, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s44296-025-00066-8.

CASTRO, D. N.; OLIVEIRA, D. A.; LIMA JÚNIOR, F. B.; SOLIANI, R. D. Integrated framework of logistics and circular economy in bioeconomic value chains in the Amazon: a systematic review. **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 72, p. 67–96, 2026. DOI: https://doi.org/10.38116/ppp72art3.

CHIARAMONTI, D.; LEHMANN, J.; BERRUTI, F.; GIUDICIANNI, P.; SANEI, H.; MAŠEK, O. Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. **Biochar**, v. 6, 81, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7.
JOSEPH, S. et al. How biochar works, and when it does not: a review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1731–1764, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12885.

LIU, H. et al. Meta-analysis compares the effectiveness of modified biochar and raw biochar in reducing cadmium availability in soil and accumulation in plants. **Frontiers in Environmental Science**, v. 12, 1413047, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1413047.

NATALLI, L. H.; HILLIG, E.; LOMBARDI, K. C.; GODINHO, M.; NUÑEZ, R. P. Use of biochar as a component of substrates in horticulture and forestry: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0240027, 2024. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240027.

PINSKY, V. C.; MARCOVITCH, J.; VAL, A. L. Experimentalist governance in bioeconomy: insights from the Brazilian Amazon. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 28, n. 6, e240170, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2024240170.en.

ROBERTS, K. G.; GLOY, B. A.; JOSEPH, S.; SCOTT, N. R.; LEHMANN, J. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 827–833, 2010. DOI: https://doi.org/10.1021/es902266r.

RUFÍNO, C. P. B.; ANDRADE NETO, R. C.; LUNZ, A. M. P.; ARAÚJO, C. S.; ARAÚJO NETO, S. E.; BARBOSA, J. T. L.; RIMÉRIO, F. P. Brazil-nut shell biochar optimizes nursery media and planting-stock quality in *Euterpe precatoria* under contrasting fertilization regimes. **Revista Árvore**, v. 50, e5015, 2026. DOI: https://doi.org/10.53661/1806-9088202650264036.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar from Acai agroindustry waste: study of pyrolysis conditions. **Waste Management**, v. 96, p. 158–167, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.022.

SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S. J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açaí waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36–46, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001.

WANG, C.; LUO, D.; ZHANG, X.; HUANG, R.; CAO, Y.; LIU, G.; WANG, H. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: a mini review. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 10, 100167, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167.

WENG, Z. H.; COWIE, A. L. Estimates vary but credible evidence points to gigaton-scale climate change mitigation potential of biochar. **Communications Earth & Environment**, v. 6, 259, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-025-02228-x.

WOOLF, D.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; KISHIMOTO-MO, A. W.; McCONKEY, B.; BALDOCK, J. Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 21, p. 14795–14805, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425.

YE, P.; GUO, B.; QIN, H. et al. The state-of-the-art review on biochar as green additives in cementitious composites: performance, applications, machine learning predictions, and environmental and economic implications. **Biochar**, v. 7, 21, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s42773-024-00423-1.

YUAN, Z.; WANG, Y.; ZHU, L.; SUN, Y.; ZHANG, C. Machine-learning-aided biochar production from aquatic biomass. **Carbon Research**, v. 3, 77, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44246-024-00169-2

ECONOMIA CIRCULAR NA AMAZÔNIA: TRANSFORMANDO RESÍDUOS EM BIOCARVÃO

Fundamentos, tecnologias e perspectivas para o desenvolvimento sustentável



Wissen Editora
Teresina, Piauí, 2026
Site: www.editorawissen.com.br
Contato: 86 98173-3137
E-mail: wisssseneditora@gmail.com
Instagram: @wisseneditora

Bruno Kleidson da Silva Maia
Matheus Gustavo dos Santos Canuto
Matheus Vinícius da Costa Pantoja
Kalwan Maciel Martins de Jesus

Wissen
2026