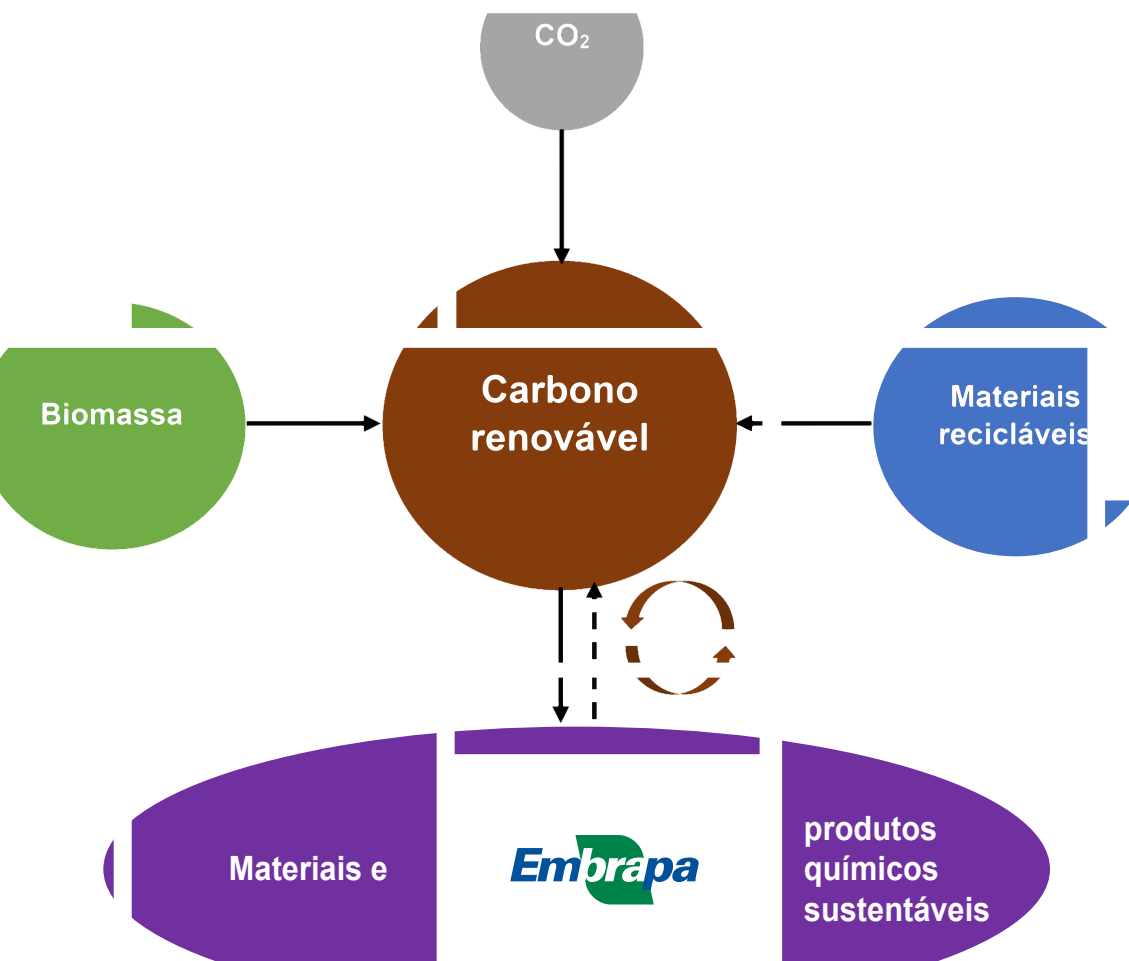




Potencial do carbono renovável para a economia circular



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura e Pecuária***

DOCUMENTOS 53

Potencial do carbono renovável para a economia circular

Silvio Vaz Júnior

***Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2023***

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroenergia

Presidente
Patrícia Verardi Abdelnur

Secretária-Executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
*Alexandre Nunes Cardoso, Betulia de Moraes
Souto, João Ricardo Moreira de Almeida,
Leonardo Fonseca Valadares, Diogo Keiji
Nakai, Patrícia Abrão de Oliveira Molinari,
Priscila Seixas Sabaini*

Supervisão editorial
Antonio Claudio da Silva Barros

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Galon Arruda

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Maria Goreti Braga dos Santos

Ilustração da capa
Silvio Vaz Júnior

1ª edição
Publicação digital (2023): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agroenergia

Vaz Júnior, Silvio.

Potencial do carbono renovável para a economia circular / Silvio Vaz Júnior.
-- Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2023.

PDF (20p.) – (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISBN 2177-4439; 53). 1.
Mercado de carbono. 2. Bioeconomia. 3. Políticas Públicas. 4. Aquecimento
global. 5. Desenvolvimento Sustentável. 6. Economia circular. I. Título. II.
Embrapa Agroenergia. III. Série.

CDD 577.144 (23. ed.)

Fábio Lima Cordeiro (CRB-1/1763)

© Embrapa, 2023

Autor

Silvio Vaz Júnior

Químico, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Apresentação

Este documento trata da definição do conceito de carbono renovável (CR) e dos materiais carbonáceos mais representativos a serem aplicados para atingir a proposta de economia circular. A biomassa, o dióxido de carbono e os plásticos recicláveis são potenciais matérias-primas para muitos produtos, como produtos químicos, materiais diversos, entre outros. Esses materiais são apresentados e discutidos neste trabalho. A estratégia de uso do CR pode ser uma valiosa contribuição para a economia circular porque promove a renovabilidade como motor industrial da matéria-prima carbonácea e ajuda a reduzir o efeito estufa e, conseqüentemente, as alterações climáticas. A partir dessas observações, o CR pode contribuir para o desenvolvimento de cadeias de valor sustentáveis para a sociedade moderna.

Alexandre Alonso Alves
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Introdução.....	9
Ciclo global do carbono.....	9
Aspectos conceituais do carbono renovável.....	11
Definição de carbono renovável.....	12
Matérias-primas carbonáceas para uso industrial.....	14
Biomassa.....	14
Dióxido de carbono (CO ₂).....	15
Materiais recicláveis.....	16
Conclusão.....	18
Referências.....	19

Introdução

A definição do conceito de carbono renovável (CR) e das estratégias para o aproveitamento de seu potencial econômico abrangem várias vertentes, como a agricultura e a agroquímica, a química ambiental, a biotecnologia, a nanotecnologia, a ciência dos materiais, a engenharia química, entre outras, tornando esse conceito um tema muito promissor, que será explorado neste documento.

Primeiramente, é importante ressaltar que o ciclo biogeoquímico do carbono é essencial na vida e no equilíbrio ecológico do planeta. Isso torna esse elemento químico um dos principais constituintes dos sistemas biológicos. Ambas as classes de produtos renováveis – materiais e produtos químicos – devem promover impactos positivos na economia, na sociedade e no meio ambiente. Ademais, esses materiais e produtos químicos renováveis estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, principalmente ao ODS 12 – “Consumo e Produção Responsáveis”, que visa a assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, e ao ODS 13 – “Ação Contra a Mudança Global do Clima”, já que o aproveitamento do dióxido de carbono leva a uma diminuição na emissão desse gás e a uma consequente redução na contribuição dele ao aquecimento global. (Nações Unidas Brasil, 2023).

Ciclo global do carbono

Há 150 anos, a concentração natural de dióxido de carbono na atmosfera da Terra era de 280 ppm. Em 2013, como resultado da combustão de combustíveis fósseis com oxigênio, havia 390 ppm desse gás presente (Royal Society of Chemistry, 2023). O dióxido de carbono atmosférico permite a entrada de luz visível, mas evita que alguns infravermelhos escapem (o efeito estufa natural). Isso mantém a Terra quente o suficiente para sustentar a vida. No entanto, um aumento do efeito estufa está em andamento, em razão de um aumento induzido pelo homem no dióxido de carbono atmosférico. Isso está afetando os seres vivos à medida que nosso clima muda. O ciclo biogeoquímico do carbono (Figura 1) é essencial para a vida e para o equilíbrio ecológico do meio ambiente.

A exploração industrial de produtos carbonáceos envolve desde os inorgânicos, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dissulfeto de carbono (CS₂), carbonatos, bicarbonatos, até os orgânicos, a exemplo de hidrocarbonetos de petróleo, polímeros, etc. Assim, a ciência, a tecnologia e o uso do carbono são muito amplos, envolvendo diversos setores econômicos e questões ambientais.

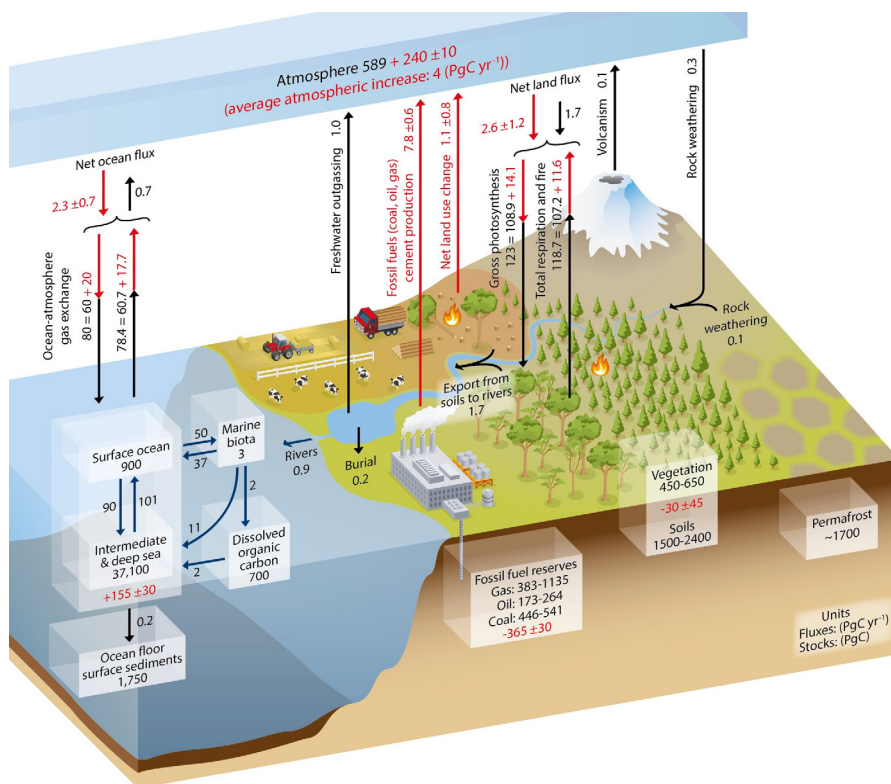


Figura 1. Esquema simplificado do ciclo global do carbono. Os números representam a massa do reservatório, isto é, os estoques de carbono, em pentagramas de carbono (PgC), e os fluxos anuais de troca de carbono, em PgC/ano. Números e setas pretas indicam a massa do reservatório e os fluxos de troca estimados para o período anterior à Era Industrial, por volta de 1750. Fonte: Intergovernmental panel on climate change, 2013.

Aspectos conceituais do carbono renovável

A renovabilidade é a condição pela qual um determinado material ou molécula, ou seja, precursor ou matéria-prima, pode ser utilizado de forma circular, sem que haja seu esgotamento.

A economia circular, estratégia econômica para alcançar a renovabilidade, é definida pelo Parlamento Europeu (European Parliamentary Research Service, 2023) como “um modelo de produção e consumo, que envolve compartilhar, alugar, reutilizar, reparar, reformar e reciclar materiais e produtos existentes por tanto tempo que possível; desta forma, o ciclo de vida dos produtos é estendido”. Na prática, significa reduzir o desperdício ao mínimo. Quando um produto chega ao fim de sua vida útil, seus materiais são mantidos na economia sempre que possível. Eles podem ser usados repetidamente de forma produtiva criando, assim, mais valor. Por exemplo, a utilização do conceito de economia circular para resíduos de biomassa – uma das principais fontes de materiais carbonáceos – pode envolver (Vaz Jr., 2020):

- a) Redução da geração de resíduos por meio do aproveitamento de todos os subprodutos e/ou coprodutos gerados durante o processamento.
- b) Criação de novas cadeias de valor baseadas na valorização de resíduos.

Outro conceito importante para a perspectiva da renovabilidade é a bioeconomia. Segundo a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2018), a bioeconomia refere-se ao “conjunto de atividades econômicas relacionadas à invenção, desenvolvimento, produção e uso de produtos e processos biológicos”. A bioeconomia tem um escopo amplo, e sua aplicabilidade à biomassa como fonte de CR é óbvia. Novas oportunidades decorrentes do modelo de bioeconomia são amplamente encontradas na manufatura, na bioquímica e na agricultura, mas as estratégias de exploração também devem incluir inovações aceleradas para a segurança alimentar e a proteção dos recursos naturais (Braun, 2018).

De acordo com a Associação Americana de Química (American Chemical Society, 2023), a química sustentável e verde é apenas uma maneira diferen-

te de pensar sobre como a química e a engenharia química podem ser feitas. Ao longo dos anos, foram propostos 12 princípios que podem ser usados para o design, o desenvolvimento e a implementação de produtos e processos químicos, destacando-se o princípio 7, que trata do uso de matérias-primas renováveis.

Ademais, cabe aqui considerar, ainda, a abordagem carbono zero (ou *carbon net-zero*), que vai de encontro à aplicabilidade do CR. Essa abordagem considera a não adição de nenhuma emissão de CO₂-equivalente na atmosfera pelo produto e/ou processo, o que envolve a eliminação das emissões indiretas geradas por toda a cadeia de valor, incluindo fornecedores e clientes (International Organization for Standardization, 2023).

A partir desses entendimentos, estratégias de uso do CR baseadas no reaproveitamento das fontes de carbono podem ser valiosas contribuições para repensar o modelo econômico estabelecido, de forma a promover a economia circular e a bioeconomia, pois considera como fontes industriais de matéria-prima carbonácea a biomassa, o dióxido de carbono e materiais recicláveis (Renewable Carbon Initiative, 2023; Vaz Jr., 2022; Carus et al., 2020).

Definição de carbono renovável

Conforme previamente descrito, o conceito de CR (Figura 2) pode ser definido como o uso de CO₂, biomassa e materiais recicláveis como matérias-primas industriais com expectativa de redução do impacto ambiental nas cadeias de valor relacionadas.

Desse conceito, pode-se derivar várias estratégias tecnológicas para alcançar produtos e processos industriais mais sustentáveis para a sociedade moderna.

Pode-se considerar como fontes de CR de produtos e processos da sociedade moderna:

- a) Biomassa: culturas, resíduos agroindustriais e resíduos animais. As primeiras e os segundos são os mais comuns para fins industriais para gerar produtos derivados, como alimentos, rações, biocombustíveis,

polímeros, materiais, etc. No entanto, proteínas e gorduras animais também são usadas para ração e para biocombustíveis, respectivamente.

- b) Dióxido de carbono (CO_2). Gerado a partir da combustão de combustíveis fósseis, ou seja, carvão, gás natural e óleo diesel, para geração de energia (eletricidade); da combustão de combustíveis fósseis (por exemplo, gasolina e óleo diesel) para transporte; da indústria de cimento; da combustão de biomassa de atividades agrícolas; da geração de biogás; entre outros.
- c) Reciclagem de materiais. Plásticos para uso industrial e diversos; papéis de embalagens e usos comuns.

Os exemplos acima descrevem fontes representativas de CR baseadas em materiais carbonáceos. Em alguns casos, como embalagens, plásticos e papéis, esses materiais estão associados a metais; isso significa que também são esperados componentes inorgânicos que são tratados como contaminantes.

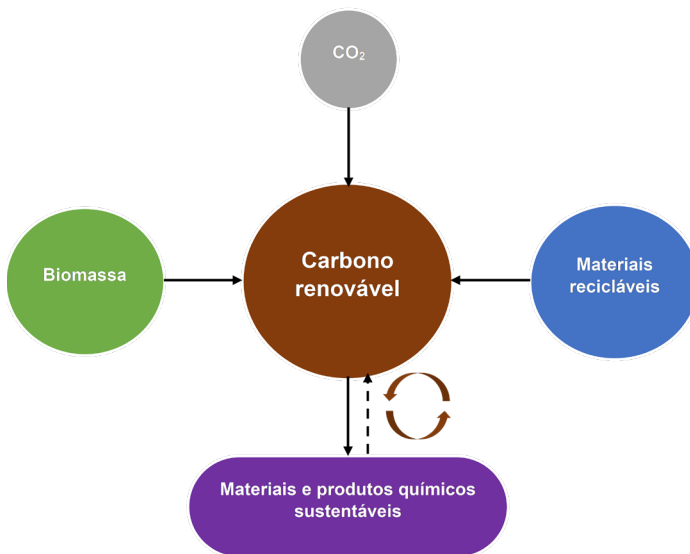


Figura 2. Ilustração do conceito de carbono renovável, considerando uma via cíclica para matérias-primas e produtos.

O desenvolvimento e a produção de materiais e produtos químicos sustentáveis são objetos de esforços de aplicação do conceito de CR aplicado ao mundo real. A Figura 2 ilustra um conceito inteligente para alcançar a economia circular por meio da renovabilidade de matérias-primas e seus produtos, o que também vai de encontro ao princípio 7 da química verde.

Matérias-primas carbonáceas para uso industrial

De acordo com a definição anterior de CR, pode-se considerar como materiais carbonáceos aqueles derivados de biomassa, dióxido de carbono e materiais recicláveis como fontes de matérias-primas para fins industriais.

Biomassa

A necessidade de desenvolver matérias-primas renováveis para a química industrial em substituição ao petróleo tem se mostrado um desafio estratégico para o século XXI. Nesse contexto, a utilização de diferentes tipos de biomassa vegetal – destacando-se amiláceas, lignocelulósicas, oleaginosas e sacarídicas – pode se consolidar tanto como uma alternativa de utilização de matérias-primas mais baratas e menos poluentes para processos de transformação na indústria química e de química fina quanto como um modelo de agregação de valor econômico às cadeias agroindustriais, como de soja, cana-de-açúcar, milho e florestas. Essas linhas de atuação podem, sobretudo, contribuir para a sustentabilidade de uma vasta gama de produtos químicos, especialmente os orgânicos, como ácidos orgânicos, ésteres, álcoois, açúcares, fenólicos, etc., amplamente utilizados na sociedade moderna associados a rações, alimentos, produtos farmacêuticos, de beleza e de cuidados, agroquímicos, entre outros.

A alta heterogeneidade e a conseqüente complexidade química da biomassa vegetal tornam-na matéria-prima para vários produtos finais, como energia, alimentos, produtos químicos, farmacêuticos e materiais. Podem ser destacados quatro tipos de biomassa vegetal de grande interesse econômico, e para os quais se volta atenção: oleaginosas, sacarídeos (ou açucarados), amiláceos e lignocelulósicos. A soja (*Glycine max*) e a palma (*Elaeis guinensis*)

são exemplos de espécies oleaginosas. A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) e o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) são biomassas sacarídicas. O milho (*Zea mays*) é uma biomassa amilácea. Já bagaço, palha e biomassa lenhosa são biomassas lignocelulósicas.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2023), as produções média global de biomassa agroindustrial – considerando-se as commodities mais produzidas –, no período de 1994 a 2021, são:

- a) Cereais: 3,2 Gt.
- b) Cultivares produtoras de açúcar: 1,8 Gt.
- c) Oleaginosas: 0,7 Gt.

Essa alta produção pode ser vista como uma grande fonte de CR para fins industriais advindos tanto de seus componentes (carboidratos, proteínas, óleos, etc.) quanto dos resíduos de seu processamento industrial, com esses últimos deixando de ser fontes de passivos ambientais para se tornarem fontes de matéria-prima renovável.

Dióxido de carbono (CO₂)

É um gás originado de diversos processos, naturais (biogênicos) e antrópicos. É produzido durante a respiração por todos os animais, fungos e microrganismos, que dependem direta ou indiretamente de plantas vivas ou em decomposição para alimentação, e atividades antrópicas, principalmente a partir de processos de combustão utilizando combustíveis fósseis com efeitos deletérios ao meio ambiente. No entanto, o dióxido de carbono é considerado um gás com potencial para ser utilizado como matéria-prima para diversos compostos químicos e materiais (Poliakoff et al., 2015). Como aplicações comerciais, destacam-se: uso como solvente para extração por fluido supercrítico, como agente vasodilatador, como anestésico, como antagonista, como gás para embalagens de alimentos, como propelente alimentar, como gás para refrigerantes. Além disso, é um metabólito da atividade da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, utilizada na produção de etanol.

Segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency, 2021), apesar do declínio em 2020, as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia permaneceram em 31,5 Gt, o que contribuiu para que o CO₂ atingisse sua maior concentração média anual na atmosfera, de 412,5 ppm, em 2020, cerca de 50% maior do que quando a revolução industrial começou.

Apesar do risco ambiental da produção desse gás – com influência direta no aquecimento global – ele pode ser visto como uma fonte promissora de CR se for considerado sob critérios científicos e tecnológicos (Vaz Jr. et al., 2022).

Os gases de efeito estufa (GEE), principalmente dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, possuem uma estrutura molecular capaz de absorver uma certa quantidade de calor e essa capacidade configura o efeito do aquecimento global (Kweku et al., 2018). Se a concentração de moléculas nesses gases for alta, o manto protetor da Terra fica sobrecarregado de calor, causando o aquecimento global. O dióxido de carbono contribui com 53% para o efeito estufa (Falci, 2019). Como o aquecimento global é um assunto de grande interesse econômico, social e ambiental, a maioria dos países tem direcionado grandes ações para a mitigação dos GEE, o que deve envolver tecnologias e processos de captura e uso de carbono (CCU) para a molécula de dióxido de carbono.

Materiais recicláveis

A fonte mais comum de CR vem de materiais já usados em uma determinada cadeia de valor, como plásticos e pneus, transformando-os de um problema ambiental em uma fonte de matéria-prima industrial. Cabe aqui considerar que esses materiais advêm da “tecnosfera”, ou seja, do ecossistema industrial criado pelo ser humano (Carus et al., 2020).

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, 2023), alguns dos bens de consumo comuns que podem ser considerados recicláveis são:

- a) Papel. Representa 23% dos resíduos sólidos urbanos (lixo) gerados anualmente, mais do que qualquer outro material.

b) Plásticos. Mais de 35 milhões de toneladas de plásticos foram geradas só nos Estados Unidos, em 2018, o que representou cerca de 12% do fluxo de resíduos. Exemplos de plásticos recicláveis são poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (PE-LD), poli(cloreto de vinila) (PVC), polietileno de alta densidade (PE-HE), poli(tereftalato de etileno) (PET).

c) Pneus.

Considerando os plásticos, principal fonte de materiais carbonáceos recicláveis, são produzidos anualmente mais de 380 milhões de toneladas deles no mundo. Apenas 16% dos resíduos plásticos são reciclados para produzir novos plásticos, enquanto 40% são enviados para aterros sanitários, 25% para incineração e 19% são descartados (Latham, 2021).

Tomando como exemplo o PET, suas características estão relacionadas à transparência e à resistência ao desgaste e à corrosão. Possui alta resistência e acabamento liso, o que explica sua ampla utilização em garrafas de água mineral, refrigerantes, sucos, óleos comestíveis, produtos farmacêuticos, etc. O poliéster é geralmente transparente e sua resistência à tração pode atingir de um terço à metade da do aço, se processado por projeto orientado.

Com o uso em larga escala das garrafas PET, principalmente a partir da década de 1990, surgiu um grave problema ambiental: muitas dessas garrafas foram descartadas incorretamente e acabaram em solos, rios, esgotos, mares e florestas. Mas esse material pode levar até 800 anos para se decompor (daí a importância de sua coleta e reciclagem). Algumas pessoas, para se livrar do volume das garrafas, podem pensar em queimar o material. Quando o PET é queimado, ele apresenta uma chama amarelada, que pode explodir durante a queima. Mas, além de ser muito inflamável, o material libera na atmosfera toxinas e gases como monóxido e dióxido de carbono, acetaldeído, benzoato de vinila e ácido benzoico, contribuindo para a poluição do ar (Sovová et al., 2008).

O plástico em geral é o poluente mais comumente encontrado nos oceanos, sendo observado na forma de microplásticos, um poluente emergente de preocupação ambiental (Vaz Jr., 2018). Em alguns sistemas de correntes marítimas rotativas, a quantidade de plástico encontrada é tão grande que já

se tornou parte do oceano. Além disso, os microplásticos – em pedaços de plástico com tamanho inferior a 5 mm – podem ser observados no solo, nas águas superficiais e subterrâneas (Panfeng et al., 2019).

Uma completa exploração sustentável de todo o potencial das fontes de CR envolve:

- a) Estratégias tecnológicas voltadas para o desenvolvimento e/ou a adaptação de tecnologias de transformação relacionadas a processos físicos, químicos e biológicos.
- b) Estratégias de políticas públicas para fomentar as primeiras, por meio de políticas de Estado, como investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, e não semente de governos.

Conclusão

A definição de carbono renovável (CR) compreende três componentes: biomassa, dióxido de carbono e materiais recicláveis, que são largamente produzidos e utilizados pela sociedade moderna.

Com efeito, a biomassa, o dióxido de carbono e os plásticos reciclados são potenciais matérias-primas para diversos produtos, como compostos químicos, materiais, entre outros. O entendimento dessas três fontes de CR e suas propriedades físico-químicas pode iniciar o desenvolvimento de cadeias de valor sustentáveis para substituir matérias-primas fósseis, considerando a biomassa e o dióxido de carbono, ou reutilizar aquelas já produzidas, para o caso dos materiais recicláveis. Tais estratégias atendem perfeitamente à proposta da economia circular.

Além disso, o átomo de carbono é um dos constituintes mais versáteis das moléculas orgânicas, atuando como esqueleto para produtos derivados delas e um alvo perfeito para a aplicação dos princípios da química verde.

Observa-se, assim, que há um grande potencial no Brasil e no mundo para o avanço na proposta de consolidação de uma economia circular, na ótica da bioeconomia e da economia verde. É nesse contexto que se insere o conceito de renovabilidade e carbono renovável discutido no presente trabalho. Muito

esforço deverá ser feito para que esta realidade se concretize, o que vai envolver estratégias tecnológicas e de políticas públicas.

Desse modo, a pesquisa e o desenvolvimento de produtos derivados de fontes de CR mostram-se de relevância e aplicabilidade crescentes, conforme a consciência ambiental mundial também aumenta.

Referências

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. Green Chemistry Institute. **12 principles of green chemistry**. Disponível em: <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>. Acesso em: 31 mar. 2023.

BRAUN, J. von. Bioeconomy: the global trend and its implications for sustainability and food security. **Global Food Security**, v. 19, p. 81-83, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.10.003>. Acesso em: 30 mar. 2023.

CARUS, M.; DAMMER, L.; RASCKA, A.; SKOCZINKI, P. Renewable carbon: key to a sustainable and future-oriented chemical and plastic industry: definition, strategy, measures and potential. **Greenhouse gases: science and technology**, v. 10, p. 488-505, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ghg.1992>. Acesso em: 31 mar. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Carbon and other biogeochemical cycles. In: CLIMATE CHANGE 2013: The Physical Science Basis. Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>. Acesso em: 31 mar. 2023.

EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE. **Circular economy**. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/thinktank/infographics/circulareconomy/public/index.html>. Acesso em: 12 março 2023.

FALCI, P. A. **Repensando práticas em educação ambiental: proposta de uma sequência didática**. 2019. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FAO . **Crops and livestock products**. Faostat. Food and agriculture data. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 31 março 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. CO₂ emissions: Global CO₂ emissions rebound by nearly 5% in 2021, approaching the 2018-2019 peak. **Global Energy Review, 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions>. Acesso em: 31 mar. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Net zero guidelines**. Disponível em: <https://www.iso.org/netzero>. Acesso em: 30 jun. 2023.

KWEKU, D. W.; BISMARCK, O.; MAXWELL, A.; DESMOND, K. A.; DANSO, K. B.; OTI-MENSAH, E. A.; QUACHIE, A.T.; ADORMAA, B. B. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. **Journal of Scientific Research & Reports**, v. 17, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/39630>. Acesso em: 31 mar. 2023.

LATHAM, K. The way we normally recycle plastics is a downward spiral of waste and degraded materials, but there is another option – turning plastic back into the oil it was made from. **BBC Future Planet**, Pollution, 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20210510-how-to-recycle-any-plastic>. Acesso em: 31 mar. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 12 mar. 2023.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Meeting policy challenges for a sustainable bioeconomy**. Paris: OECD Publishing, 2018. Disponível em: <https://www.oecd.org/publications/policy-challenges-facing-a-sustainable-bioeconomy-9789264292345-en.htm>. Acesso em: 12 março de 2023.

PANFENG, W.; JINSHENG, H.; YULING, Z.; YICHENG, Y.; YUE, Z.; FENG, H.; HAO, C.; GUIXIANG, Q.; JINLONG, Y.; TIAN, L.; BIN, G. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 184, 109612, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>. Acesso em: 30 mar. 2023.

POLIAKOFF, M.; LEITNER, W.; STRENG, E.S. The twelve principles of CO₂ chemistry. **Faraday Discussions**, v. 183, p. 9-17, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c5fd90078f> Acesso em: 30 mar. 2023.

RENEWABLE CARBON INITIATIVE. **The renewable carbon initiative (RCI)**. Disponível em: <https://renewable-carbon-initiative.com/>. Acesso em: 30 mar. 2023.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. **Carbon**. (Periodic Table). Disponível em: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/6/carbon>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SOVOKÁ, K.; FERUS, M.; MATULKOVÁ, I.; SPANEL, P.; DRYAHINA, K.; DVORAK, O.; CIVIS, S. A study of thermal decomposition and combustion products of disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic using high resolution fourier transform infrared spectroscopy, selected ion flow tube mass spectrometry and gas chromatography mass spectrometry. **Molecular Physics**, v. 106, p. 1205-1214, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00268970802077876>. Acesso em: 30 mar. 2023.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **How do I recycle?: common recyclables**. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/how-do-i-recycle-common-recyclables>. Acesso em: 31 mar. 2023.

VAZ JUNIOR, S. **Treatment of agroindustrial biomass residues: a sustainable approach**. Gewerbestrasse: Springer Nature, 2020. 103 p.

VAZ JUNIOR, S. **Analytical Chemistry Applied to Emerging Pollutants**. Gewerbestrasse: Springer Nature, 2018. 22 p.

VAZ JUNIOR, S. **Renewable Carbon: science, technology and sustainability**. Amsterdam: Elsevier, 2022. 220 p.

VAZ JUNIOR, S.; SOUZA, A. P. R. de; BAETA, B. E. L. Technologies for carbon dioxide capture: a review applied to energy sectors. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, 100456, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>. Acesso em: 30 mar. 2023.

Embrapa

Agroenergia

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

GOVERNO FEDERAL

UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

CGPE 017888