



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**INSTITUTO DE QUÍMICA**  
**Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis - PPGBIOCOM**

M. Sc. Dieter Allan Miers

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO AGRÍCOLA DE  
NANOCARBONATO DE CÁLCIO OBTIDO DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DE EMISSÕES  
ENERGÉTICAS**

UBERLÂNDIA

2026

**M. Sc. Dieter Allan Miers**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO AGRÍCOLA DE  
NANOCARBONATO DE CÁLCIO OBTIDO DA CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DE EMISSÕES  
ENERGÉTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis da Universidade Federal de Uberlândia / Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – Instituto de Química como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor (*stricto sensu*) em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis.

Área de concentração:  
Ambiente e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Vaz Júnior.

UBERLÂNDIA

2026

**Ficha Catalográfica *On-line* do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo próprio autor.**

M632 Miers, Dieter Allan, 1967

2026 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO  
AGRÍCOLA DE NANOCARBONATO DE CÁLCIO OBTIDO DA  
CAPTURA DE CO<sub>2</sub> DE EMISSÕES ENERGÉTICAS

Dieter Allan Miers 2026

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Vaz Júnior.

Tese (Doutorado) Universidade Federal de Uberlândia

Pós-graduação em Biocombustíveis.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.737>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Biocombustível. I. Jr., Sílvio Vaz, 1976-, (Orient.). II.

Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em

Biocombustíveis. III. Título.

CCU: 662.756

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

|                                    |                                                                                                                                                     |                 |       |                       |              |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-----------------------|--------------|
| Programa de Pós-Graduação em:      | Biocombustíveis                                                                                                                                     |                 |       |                       |              |
| Defesa de:                         | Tese de Doutorado Acadêmico, 036, PPGBIOCOM                                                                                                         |                 |       |                       |              |
| Data:                              | 23 de abril de 2026                                                                                                                                 | Hora de início: | 09:00 | Hora de encerramento: | <b>12:40</b> |
| Matrícula do Discente:             | 12223PGB002                                                                                                                                         |                 |       |                       |              |
| Nome do Discente:                  | Dieter Allan Miers                                                                                                                                  |                 |       |                       |              |
| Título do Trabalho:                | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO E APLICAÇÃO AGRÍCOLA DE NANOCARBONATO DE CÁLCIO OBTIDO DA CAPTURA DE CO <sub>2</sub> DE EMISSÕES ENERGÉTICAS |                 |       |                       |              |
| Área de concentração:              | Biocombustíveis                                                                                                                                     |                 |       |                       |              |
| Linha de pesquisa:                 | Ambiente e Sustentabilidade                                                                                                                         |                 |       |                       |              |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Projeto Agricarbono (parceria Embrapa-Eletronorbras)                                                                                                |                 |       |                       |              |
| ODS                                | ODS2 E ODS13                                                                                                                                        |                 |       |                       |              |

Reuniu-se em ambiente virtual pelo link [meet.google.com/zrs-nmkz-mfe](https://meet.google.com/zrs-nmkz-mfe), a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, assim composta pelos Professores Doutores: **Cícero Célio de Figueiredo**, da Universidade de Brasília; **Rosana do Carmo Nascimento Guiducci** e **Carlos Eduardo Pacheco Lima**, da EMBRAPA; **Érica Gravina**, do New Wave Tech; e **Sílvio Vaz Junior**, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). **Sílvio Vaz Junior**, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

**Aprovado(a).**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cícero Célio de Figueiredo, Usuário Externo**, em 28/04/2026, às 08:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sílvio Vaz Júnior, Usuário Externo**, em 28/04/2026, às 08:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosana do Carmo Nascimento Guiducci, Usuário Externo**, em 28/04/2026, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Erica Goncalves Gravina, Usuário Externo**, em 28/04/2026, às 21:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Pacheco Lima, Usuário Externo**, em 30/04/2026, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **7253745** e o código CRC **4125A4E6**.

**Referência:** Processo nº 23117.026808/2026-52

SEI nº 7253745

---

## DEDICATÓRIA

---

Dedico este trabalho aos meus filhos,  
Alexander, Katharina, Luisa e Robert Miers  
(o Berço), pelo estímulo, suporte e pela  
compreensão; e à minha esposa, Angelika  
Mosig-Miers (o Túmulo), que não pôde  
contemplar a finalização deste trabalho.

---

---

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço aos amigos, irmãos, filhos e à minha mãe pelo incentivo, pela motivação e compreensão de minha falta em muitas atividades e festividades, mesmo assim expressando os votos de sucesso em prol da minha caminhada acadêmica.

Aos professores e às professoras, aos colegas de profissão e de academia, por partilhar conhecimentos, por aprendermos uns com os outros e termos os mesmos interesses em melhorar o mundo em que vivemos.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Vaz Júnior, da Embrapa Agroenergia, pelos inúmeros momentos de trabalhos conjuntos, tanto em atividades profissionais quanto em encontros familiares, antes e durante sua orientação, por permitir o meu aprimoramento profissional, estabelecendo novas perspectivas nas interações internacionais, e pela confiança em nosso trabalho.

Às pessoas que inicialmente me eram desconhecidas, tais como a M.Sc. Ana Paula de Souza e o Dr. Guilherme Pessoa Nogueira, que, devido ao tema deste trabalho, se transformaram em colegas de trabalho e, logo em seguida, se tornaram amigas e amigos confiáveis na vida cotidiana.

Registro minha gratidão à Dra. Érica Gonçalves Gravina pela síntese do NCC em laboratório e pela disponibilização dos dados de inventário utilizados na ACV; à Dra. Daniela Tatiane de Souza, pela contribuição nas análises econômicas e nos cálculos relacionados a créditos e mercado de carbono associados ao NCC; e ao Dr. Carlos Eduardo Pacheco Lima, pela validação experimental com alface, fundamental para a avaliação agrônômica do NCC. Estendo esse reconhecimento à Embrapa, à DEHEMA e à UFU (PPGBIOCOM) pelo suporte institucional e pelas condições oferecidas para a realização do doutorado.

À minha amada esposa, que, ao falecer, no final do primeiro semestre, me ensinou com sua partida que eu não deveria odiar o mundo, e sim auxiliar a melhorar o mundo em que vivemos, pensando em nossos filhos e nas próximas gerações.

---

**EPIÍGRAFE:**

---

**Saber e fazer...**

“O saber começa no ‘só sei que nada sei’”. (Sócrates)

“O fazer começa com o trabalho na pedra bruta e dela extrair a essência.” (Tubalcaim, Gn 4:22).

Entre saber e fazer, criamos o mundo em que vivemos.

Sócrates e Tubalcaim nos ensinam sobre a importância da inovação e sobre como ela pode ser usada, tanto para o bem quanto para o mal. Nos dias de hoje, a história nos desafia a refletir sobre como utilizamos nossas habilidades tecnológicas e criativas:

Estamos construindo ferramentas para edificar a humanidade ou para destruí-la?

---

## RESUMO

---

As mudanças climáticas extremas, impulsionadas pelo aumento das temperaturas médias globais e das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), decorrem, em grande medida, da dependência contínua de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, ainda central na matriz energética. Nesse contexto, torna-se prioritário desenvolver tecnologias de captura e uso de carbono (CCU, do inglês *Carbon Capture and Use*) capazes de mitigar parte das emissões associadas a essas fontes, sem comprometer a segurança energética. Este estudo avalia uma rota inovadora em que o CO<sub>2</sub> de emissões industriais é capturado por borbulhamento químico e convertido em nanocarbonato de cálcio (NCC), utilizado como nanocorretivo agrícola. O NCC apresenta maior reatividade, melhor dispersão e neutralização mais rápida da acidez do solo, em comparação a calcários convencionais, podendo ser aplicado em sistemas de produção de soja e alface. A avaliação do ciclo de vida (ACV), conduzida no openLCA segundo as normas ISO 14040:2006 e 14044:2009 e o método IPCC 2013, abrangeu, inicialmente, o escopo do berço ao portão (*cradle-to-gate*). A partir da fronteira do berço ao campo (*cradle-to-field*), utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint (H), foram integrados a captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa (soja e alface) e o armazenamento de longo prazo no solo ( $\Delta$ SOC), estimando-se, de forma preliminar, até 12 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para soja e 3 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para alface, além de ganhos adicionais no balanço climático, associados ao sequestro e ao armazenamento de carbono no solo. Os resultados indicaram que a tecnologia de NCC pode reduzir a pegada de carbono da calagem agrícola, gerar créditos de carbono e apoiar estratégias de economia circular no setor energético e de produção de alimentos.

**Palavras-chave:** Do berço ao portão; do berço ao campo; carbonato de cálcio precipitado; nanofertilizantes; CO<sub>2</sub> biogênico.

---

## ABSTRACT

---

Extreme climate change, driven by rising global average temperatures and increasing greenhouse gas (GHG) emissions, is largely associated with the continued dependence on fossil fuels, such as mineral coal, which still plays a central role in the energy matrix. In this context, it becomes a priority to develop carbon capture and use (CCU) technologies capable of mitigating part of the emissions associated with these sources without compromising energy security. This study evaluates an innovative route in which CO<sub>2</sub> from industrial emissions is captured by chemical bubbling and converted into nano calcium carbonate (NCC), used as an agricultural nano-liming material. Compared with conventional limestones, NCC presents higher reactivity, better dispersion, and faster neutralization of soil acidity, making it suitable for application in soybean and lettuce production systems. The life cycle assessment (LCA), conducted in openLCA according to ISO 14040:2006 and 14044:2009 and the IPCC 2013 method, initially covered the cradle-to-gate scope. From the cradle-to-field boundary onward, and using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method, the capture of biogenic CO<sub>2</sub> in biomass (soybean and lettuce) and its long-term storage in soil ( $\Delta$ SOC) were integrated, providing preliminary estimates of up to 12 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> for soybean and 3 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> for lettuce, in addition to further gains in the climate balance associated with carbon sequestration and storage in soil. The results indicated that NCC technology can reduce the carbon footprint of agricultural liming, generate carbon credits, and support circular economy strategies in the energy and food production sectors.

**Keywords:** Cradle-to-gate; cradle-to-field; precipitated calcium carbonate; nanofertilizers; biogenic CO<sub>2</sub>.

---

## LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Média anual (linha fina) e décadas (linha grossa) da temperatura da superfície global, expressas como uma mudança de temperatura do período de referência de 1850-1900. ....              | 28 |
| <b>Figura 2</b> – Fontes de emissões antropogênicas. ....                                                                                                                                                   | 30 |
| <b>Figura 3</b> – Fase de um estudo de ACV.....                                                                                                                                                             | 37 |
| <b>Figura 4</b> – Elementos da fase de interpretação e o relacionamento com as outras fases da ACV. ....                                                                                                    | 39 |
| <b>Figura 5</b> – Diagrama de fluxo do inventário de ciclo de vida. ....                                                                                                                                    | 40 |
| <b>Figura 6</b> – Categorias de impacto, áreas afetadas e exemplo de relação.....                                                                                                                           | 43 |
| <b>Figura 7</b> – Campo com opções do ReCiPe e as opções a serem selecionadas no openLCA. .                                                                                                                 | 45 |
| <b>Figura 8</b> – Estruturas cristalinas de polimorfos e minerais relacionados ao $\text{CaCO}_3$ (Adaptado do acervo de minerais economicamente relevantes, do Museu de Minerais, Minérios e Rochas). .... | 52 |
| <b>Figura 9</b> – Variação dos valores monetários de créditos de carbono, em Euros. ....                                                                                                                    | 60 |
| <b>Figura 10</b> – Representação esquemática das abordagens de ACV, considerando a abordagem do berço ao portão, do berço ao campo, do berço ao túmulo. ....                                                | 62 |
| <b>Figura 11</b> – Fluxograma das etapas de síntese do nanocarbonato de cálcio (NCC) a partir da captura de $\text{CO}_2$ de usina termelétrica, incluindo reação, separação e secagem.....                 | 64 |
| <b>Figura 12</b> – Descrição do processo de fixação de $\text{CO}_2$ (Etapa I). ....                                                                                                                        | 65 |
| <b>Figura 13</b> – Descrição do processo de recuperação do nanocarbonato de cálcio precipitado (Etapa II).....                                                                                              | 67 |
| <b>Figura 14</b> – Validação da performance do NCC em alfaces cultivadas em vasos na estufa da Embrapa Hortaliças, com pesagem para estimativa da massa úmida e da massa seca total. ...                    | 68 |
| <b>Figura 15</b> – Contribuição entre as categorias de impacto e análise do inventário da ACV. ....                                                                                                         | 71 |
| <b>Figura 16</b> – Sistema de produto e limite de fronteira em destaque. ....                                                                                                                               | 78 |
| <b>Figura 17</b> – Mudança climática potencial de temperatura global em 100 anos. ....                                                                                                                      | 93 |
| <b>Figura 18</b> – Mudança climática potencial de temperatura global em 20 anos. ....                                                                                                                       | 94 |
| <b>Figura 19</b> – Mudança climática potencial de aquecimento global em 100 anos.....                                                                                                                       | 95 |
| <b>Figura 20</b> – Mudança climática potencial de aquecimento global em 20 anos.....                                                                                                                        | 96 |
| <b>Figura 21</b> – Redução percentual dos impactos ambientais do NCCopt em relação ao NCClab (por kg de NCC) nas categorias selecionadas. ....                                                              | 98 |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 22</b> – Comparação percentual dos impactos ambientais da produção de alface entre os cenários sem calagem, com calcário, NCClab e NCCopt. .... | 107 |
| <b>Figura 23</b> – Comparação percentual dos impactos ambientais da produção de soja entre os cenários sem calagem, com calcário, NCClab e NCCopt. ....   | 108 |
| <b>Figura 24</b> – Difratoograma de raios X do carbonato de cálcio precipitado em escala nanométrica, indicando a formação do polimorfo calcita. ....     | 141 |
| <b>Figura 25</b> – Produto obtido após secagem em estufa a 70 °C. ....                                                                                    | 141 |
| <b>Figura 26</b> – Fotomicrografia do produto NCC obtido por MEV. ....                                                                                    | 142 |
| <b>Figura 27</b> – Gráficos <i>Sankey</i> para aquecimento global da alface sem calcário. ....                                                            | 144 |
| <b>Figura 28</b> – Gráficos <i>Sankey</i> para aquecimento global da alface com calcário. ....                                                            | 145 |
| <b>Figura 29</b> – Gráficos <i>Sankey</i> para aquecimento global da alface com NCClab. ....                                                              | 146 |
| <b>Figura 30</b> – Gráficos <i>Sankey</i> para aquecimento global da alface com NCCopt. ....                                                              | 147 |

---

## LISTA DE TABELAS

---

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 1</b> – Principais gases de efeito estufa (GEE): fontes, poder de aquecimento e permanência na atmosfera. ....                                             | 26  |
| <b>Tabela 2</b> – Emissões totais, <i>per capita</i> e históricas de gases de efeito estufa (GEE) de países e regiões selecionados. ....                             | 29  |
| <b>Tabela 3</b> – Relação dos diferentes tipos de ACV e uma breve revisão bibliográfica sobre esses exemplos. ....                                                   | 36  |
| <b>Tabela 4</b> – <i>Softwares</i> de ACV e bancos de dados: descrição, características e disponibilidade. ....                                                      | 44  |
| <b>Tabela 5</b> – Principais aspectos para soja e alface. ....                                                                                                       | 72  |
| <b>Tabela 6</b> – Inventário (entradas e saída) do cenário NCClab (por 1 kg de NCC). ....                                                                            | 80  |
| <b>Tabela 7</b> – Inventário (entradas e saída) do cenário NCCopt (por 1 kg de NCC). ....                                                                            | 81  |
| <b>Tabela 8</b> – Inventário simplificado (entradas e saídas) do cenário Alface: C1, C2, C3 e C4. ....                                                               | 82  |
| <b>Tabela 9</b> – Inventário simplificado (entradas e saídas) do cenário Soja: C1, C2, C3 e C4. ....                                                                 | 83  |
| <b>Tabela 10</b> – Faixas de preços de referência para créditos de carbono (US\$ por tCO <sub>2</sub> ). ....                                                        | 89  |
| <b>Tabela 11</b> – Categoria de Impacto GTP e GWP do NCC. ....                                                                                                       | 92  |
| <b>Tabela 12</b> – Comparação dos impactos ambientais do NCClab e NCCopt (por kg de NCC). ....                                                                       | 98  |
| <b>Tabela 13</b> – CO <sub>2</sub> biogênico capturado na produção de alface. ....                                                                                   | 102 |
| <b>Tabela 14</b> – CO <sub>2</sub> biogênico capturado na produção de soja. ....                                                                                     | 103 |
| <b>Tabela 15</b> – Impactos ambientais da produção de alface por categoria e cenário de manejo da acidez do solo (sem calcário, com calcário, NCClab e NCCopt). .... | 106 |
| <b>Tabela 16</b> – Impactos ambientais da produção de soja por categoria e cenário de manejo da acidez do solo (calcário, NCClab, NCCopt e sem calagem). ....        | 108 |
| <b>Tabela 17</b> – Cenários de produtividade alface e soja (valor de pH 5,5 vs valor de pH 6,5). ....                                                                | 114 |
| <b>Tabela 18</b> – Valor potencial da soja e da alface em créditos de carbono em cenário moderado de captura de CO <sub>2</sub> biogênico e ΔSOC. ....               | 116 |
| <b>Tabela 19</b> – Composição das emissões de gases de chaminé de termoeletrica. ....                                                                                | 142 |
| <b>Tabela 20</b> – Equipamentos usados na Síntese de NCC. ....                                                                                                       | 143 |
| <b>Tabela 21</b> – Avaliação qualitativa de incertezas dos principais conjuntos de dados utilizados na ACV. ....                                                     | 148 |

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

- ΔSOC – Variação do carbono orgânico do solo ( $\text{tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ )
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACV – Avaliação do ciclo de vida
- AICV – Avaliação de impacto do ciclo de vida
- AFOLU – Uso da terra com agricultura e florestas (*Agriculture, forestry and other land use*)
- BET – Brunauer-Emmett-Teller (método de adsorção)
- CCS – Captura e armazenamento de carbono (*carbon capture e storage*)
- CCU – Captura e uso de carbono (*carbon capture e use*)
- CCUS – Captura, uso e armazenamento de carbono (*carbon capture, utilisation and storage*)
- CNPq – Conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico
- COP30 – 30ª Conferência das partes da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima (Belém do Pará, 2025)
- DRX – Difração de raios X (*X-ray diffraction*)
- EDX – Espectroscopia de energia dispersiva de raios X
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- GEE – Gases de efeito estufa
- GTP – Potencial de mudança de temperatura global (*Global temperature change potential*)
- GWP – Potencial de aquecimento global (*Global warming potential*)
- ha – Hectare ( $10000 \text{ m}^2$ )
- IACV – Impacto ambiental do ciclo de vida
- IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística
- IEA – Agência internacional de energia (*International energy agency*)
- IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (*Intergovernmental panel on climate change*)
- ISO – Organização internacional de normalização (*International organization for standardization*)
- NCC – Nanocarbonatos de cálcio (ou nano- $\text{CaCO}_3$ )
- NCClab – Nanocarbonato de cálcio produzido em escala laboratorial (rota experimental)
- NCCopt – Nanocarbonato de cálcio otimizado (rota de processo otimizada)
- NP – Poder de neutralização (*neutralizing power*)
- NUE – Eficiência de uso de nutrientes (*nutrient use efficiency*)

MEV – Microscopia eletrônica de varredura (*scanning electron microscopy*)

SDGs – Objetivos de desenvolvimento sustentável (*Sustainable development goals*).

SOC – Carbono orgânico do solo (*soil organic carbon*)

TRL – Nível de prontidão tecnológica (*level of technological readiness*)

TRNP – Poder relativo total de neutralização (*total relative neutralizing power*; equivalente ao PRNT)

UNEP – Programa das nações unidas para o meio ambiente (*United Nations Environment Programme*)

UNFCCC – Convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima (*United Nations framework convention on climate change*)

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

|                               |                                                                            |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta$ .....                | Variação (diferença entre os valores inicial e final de um parâmetro)      |
| $\sim$ .....                  | Aproximadamente                                                            |
| $^{\circ}\text{C}$ .....      | Grau celsius                                                               |
| $\text{CO}_2$ .....           | Dióxido de carbono                                                         |
| $\text{CO}_2\text{e}$ .....   | Dióxido de carbono equivalente (GEE em equivalentes de $\text{CO}_2$ )     |
| ha .....                      | Hectare                                                                    |
| kg .....                      | Quilograma                                                                 |
| kg óleo eq .....              | Quilograma de óleo equivalente                                             |
| kg 1,4-DCB eq ..              | Quilograma de 1,4-diclorobenzeno equivalente                               |
| kg P eq .....                 | Quilograma de fósforo equivalente (usado, por exemplo, em eutrofização)    |
| $\text{m}^3$ .....            | Metro cúbico                                                               |
| $\text{PM}_{2.5}$ .....       | Material particulado fino com diâmetro aerodinâmico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ |
| pH .....                      | Potencial hidrogeniônico                                                   |
| tC .....                      | Tonelada de carbono                                                        |
| t $\text{CO}_2$ .....         | Tonelada de dióxido de carbono                                             |
| t $\text{CO}_2\text{e}$ ..... | Tonelada de dióxido de carbono equivalente                                 |

---

## SUMÁRIO

---

|        |                                                                                    |           |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....                                                                   | 19        |
| 2.     | OBJETIVOS .....                                                                    | 24        |
| 3.     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                        | 25        |
| 3.1    | <i>Emissões líquidas totais antropogênicas de GEE, de 1990 a 2024.....</i>         | <i>27</i> |
| 3.2    | <i>Fontes das emissões.....</i>                                                    | <i>30</i> |
| 3.3    | <i>Acordo de Paris .....</i>                                                       | <i>32</i> |
| 3.4    | <i>COP30 na Amazônia e a descarbonização da agricultura brasileira.....</i>        | <i>32</i> |
| 3.5    | <i>Geração de energia em termelétricas e emissões de CO<sub>2</sub> .....</i>      | <i>33</i> |
| 3.6    | <i>Fundamentos e evolução dos modelos para avaliação de impactos .....</i>         | <i>33</i> |
| 3.7    | <i>Justificativas para a padronização da avaliação de impactos e a ACV.....</i>    | <i>34</i> |
| 3.8    | <i>Normas ISO relacionadas à avaliação do ciclo de vida.....</i>                   | <i>35</i> |
| 3.9    | <i>Definição da avaliação do ciclo de vida.....</i>                                | <i>35</i> |
| 3.9.1  | <i>Aplicações da ACV.....</i>                                                      | <i>36</i> |
| 3.9.2  | <i>Fases da ACV.....</i>                                                           | <i>37</i> |
| 3.9.3  | <i>Definição de objetivo e escopo.....</i>                                         | <i>39</i> |
| 3.9.4  | <i>Análise de inventário do ciclo de vida (ICV) .....</i>                          | <i>40</i> |
| 3.9.5  | <i>Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV).....</i>                           | <i>41</i> |
| 3.9.6  | <i>Interpretação na ACV.....</i>                                                   | <i>42</i> |
| 3.9.7  | <i>Categorias de impacto.....</i>                                                  | <i>42</i> |
| 3.9.8  | <i>Escolha entre midpoint e endpoint.....</i>                                      | <i>43</i> |
| 3.9.10 | <i>Softwares e banco de dados.....</i>                                             | <i>44</i> |
| 3.9.11 | <i>Abordagens berço ao campo em ACV agrícola .....</i>                             | <i>46</i> |
| 3.10   | <i>Processo de armazenamento, captura e uso de carbono.....</i>                    | <i>47</i> |
| 3.10.1 | <i>Definições e panorama recente (CCU, CCS e CCUS) .....</i>                       | <i>47</i> |
| 3.10.2 | <i>Tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> .....</i>                              | <i>47</i> |
| 3.10.3 | <i>Rotas de utilização do CO<sub>2</sub> e produtos derivados .....</i>            | <i>48</i> |
| 3.10.4 | <i>Carbono biogênico na ACV agrícola .....</i>                                     | <i>49</i> |
| 3.10.5 | <i>Características do calcário de rocha visando comparação com as do NCC .....</i> | <i>51</i> |
| 3.10.6 | <i>Calcário no Brasil.....</i>                                                     | <i>52</i> |
| 3.10.7 | <i>Uso da calagem agrícola.....</i>                                                | <i>53</i> |
| 3.10.8 | <i>Tipos de calcário visando concorrência com NCC.....</i>                         | <i>54</i> |

|               |                                                                                       |           |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.10.9</b> | <b>Potenciais vantagens do NCC .....</b>                                              | <b>54</b> |
| 3.11          | <i>Economia circular.....</i>                                                         | 56        |
| 3.12          | <i>Políticas públicas no Brasil e Plano Clima .....</i>                               | 56        |
| <b>3.12.1</b> | <b>ODS e metas brasileiras.....</b>                                                   | <b>57</b> |
| <b>3.12.2</b> | <b>Planos setoriais de mitigação do plano clima.....</b>                              | <b>58</b> |
| 3.13          | <i>Mercado de carbono .....</i>                                                       | 59        |
| <b>3.13.1</b> | <b>Créditos de carbono .....</b>                                                      | <b>59</b> |
| 3.14          | <i>Aspectos econômicos associados à ACV .....</i>                                     | 61        |
| <b>3</b>      | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                               | <b>62</b> |
| 4.1           | <i>Etapa I – fixação de CO<sub>2</sub> .....</i>                                      | 64        |
| 4.2           | <i>Etapa II – recuperação do nanocarbonato de cálcio precipitado.....</i>             | 66        |
| 4.3           | <i>Validação do NCC no cultivo da alface.....</i>                                     | 68        |
| 4.4           | <i>Metodologia para a seleção do software para a ACV.....</i>                         | 69        |
| 4.5           | <i>Seleção das categorias de impacto da ACV.....</i>                                  | 70        |
| 4.6           | <i>Condução da avaliação do ciclo de vida .....</i>                                   | 74        |
| 4.7           | <i>Definição do objetivo e do escopo .....</i>                                        | 75        |
| <b>4.7.1</b>  | <b>Objetivo da ACV.....</b>                                                           | <b>76</b> |
| <b>4.7.2</b>  | <b>O escopo da ACV .....</b>                                                          | <b>76</b> |
| 4.8           | <i>Análise de inventário .....</i>                                                    | 80        |
| 4.9           | <i>Impacto ambiental do ciclo de vida (IACV).....</i>                                 | 83        |
| 4.10          | <i>Interpretação dos resultados .....</i>                                             | 84        |
| 4.11          | <i>Dependência de dados secundários e representatividade .....</i>                    | 84        |
| 4.12          | <i>Fronteiras do sistema: berço ao portão e berço ao campo, sem berço ao túmulo .</i> | 85        |
| 4.13          | <i>Mudança de uso da terra e categoria uso da terra .....</i>                         | 85        |
| 4.14          | <i>Maturidade tecnológica e escala de análise do NCC.....</i>                         | 86        |
| 4.15          | <i>Simplificações nos cenários agrícolas e no manejo do solo.....</i>                 | 86        |
| 4.16          | <i>Método de avaliação de impacto e categorias não priorizadas .....</i>              | 87        |
| 4.17          | <i>Aspectos espaciais e temporais das emissões .....</i>                              | 88        |
| 4.18          | <i>Procedimento de valoração exploratória .....</i>                                   | 88        |
| <b>5</b>      | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                                    | <b>90</b> |
| 5.1           | <i>Resultados da ACV da produção de NCC (rota laboratorial).....</i>                  | 91        |
| 5.2           | <i>Objetivo e escopo (síntese) .....</i>                                              | 91        |
| 5.3           | <i>Inventário: principais fluxos e premissas .....</i>                                | 91        |
| 5.4           | <i>Avaliação de impacto mudança climática: GWP e GTP para o NCC laboratorial</i>      | 91        |

|       |                                                                                                                                                                                 |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5   | <i>Interpretação: hotspots e diretrizes para otimização</i> .....                                                                                                               | 97  |
| 5.6   | <i>Resultados da ACV berço ao campo: uso do NCC em sistemas agrícolas (alface e soja)</i> .....                                                                                 | 99  |
| 5.6.1 | <i>Objetivo e escopo (alface e soja)</i> .....                                                                                                                                  | 99  |
| 5.6.2 | <i>Análise do inventário: principais fluxos e premissas (alface e soja)</i> .....                                                                                               | 99  |
| 5.6.3 | <i>Análise dos resultados por hectare cultivado da alface</i> .....                                                                                                             | 100 |
| 5.6.4 | <i>Análise dos resultados por hectare cultivado da soja</i> .....                                                                                                               | 100 |
| 5.6.5 | <i>Resultados por tonelada de alface fresca</i> .....                                                                                                                           | 101 |
| 5.6.6 | <i>Resultados por tonelada de grão de soja</i> .....                                                                                                                            | 102 |
| 5.6.7 | <i>Principais componentes e hotspots para alface</i> .....                                                                                                                      | 104 |
| 5.6.8 | <i>Principais componentes e hotspots para soja</i> .....                                                                                                                        | 105 |
| 5.7   | <i>Avaliação de impacto ambiental (alface e soja)</i> .....                                                                                                                     | 106 |
| 5.7.1 | <i>Avaliação de impacto na alface: mudança climática</i> .....                                                                                                                  | 106 |
| 5.7.2 | <i>Avaliação de impacto na soja: mudança climática</i> .....                                                                                                                    | 107 |
| 5.8   | <i>Interpretação dos resultados – alface e soja</i> .....                                                                                                                       | 109 |
| 5.8.1 | <i>Interpretação dos resultados para alface</i> .....                                                                                                                           | 109 |
| 5.8.2 | <i>Interpretação de categorias específicas para alface: água e ecotoxicidade</i> .....                                                                                          | 109 |
| 5.8.3 | <i>Interpretação dos resultados para soja</i> .....                                                                                                                             | 110 |
| 5.8.4 | <i>Interpretação de categorias específicas para soja: N<sub>2</sub>O e GWP</i> .....                                                                                            | 111 |
| 5.9   | <i>Comparação entre culturas e entre cenários</i> .....                                                                                                                         | 113 |
| 5.10  | <i>Implicações para a descarbonização da agricultura</i> .....                                                                                                                  | 115 |
| 5.11  | <i>Considerações adicionais</i> .....                                                                                                                                           | 117 |
| 6     | CONCLUSÕES .....                                                                                                                                                                | 121 |
| 7     | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                                                                          | 123 |
| 8     | REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                                               | 125 |
|       | APÊNDICES .....                                                                                                                                                                 | 139 |
|       | ANEXO .....                                                                                                                                                                     | 149 |
|       | <i>Capítulo aceito para publicação na segunda edição do livro Sustainable Agrochemistry: A Compendium of Technologies   Springer Nature Link (Springer Nature, 2026).</i> ..... | 149 |

---

## 1. INTRODUÇÃO

---

O avanço das mudanças climáticas e o aumento contínuo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm gerado preocupações globais, evidenciadas por recordes de temperaturas e impactos ambientais significativos (Santos, 2016). O conceito de Dia da Sobrecarga da Terra, idealizado por Andrew Simms, ilustra esse desequilíbrio: desde 2006, essa data marca o momento em que a demanda humana por recursos ecológicos ultrapassou a capacidade de regeneração do planeta, tendo sido registrada em 1º de agosto para 2024 e em 24 de julho para 2025 (Earth overshoot day, 2025).

Dois marcos preocupantes foram registrados no contexto climático recente. O ano de 2024 foi o mais quente desde o início dos registros globais, com uma temperatura média anual 1,6 °C acima dos níveis pré-industriais; janeiro de 2025 foi o mês de janeiro mais quente da série histórica, com média global de 13,23 °C, correspondente a 1,75 °C acima da média do período entre 1850 e 1900, adotado como referencial pré-industrial (Copernicus Climate Change Service, 2025).

Embora a emissão de GEE ocorra naturalmente, uma parcela significativa dessas emissões é atribuída a atividades antrópicas, sendo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e o metano (CH<sub>4</sub>) os principais contribuintes. Esses gases intensificam as alterações climáticas globais, contribuindo para o aquecimento do planeta e para a maior frequência de eventos climáticos extremos (United Nations Environment Programme, 2024).

O avanço de fenômenos como o aquecimento global, provocado pelo acúmulo de GEE na atmosfera, reforça a necessidade urgente de desenvolver e implementar tecnologias inovadoras que possam mitigar os efeitos da poluição atmosférica. Tais inovações são essenciais para reduzir o impacto ambiental das atividades humanas e promover um futuro mais sustentável (Ministério do Meio Ambiente, 2024).

O uso dos recursos minerais e a eficiência na produção de alimentos em escala possibilitam o desenvolvimento de uma nação ao longo dos anos. Embora o Brasil se destaque por ser um país rico em recursos naturais, com uma enorme área e um clima favorável para fins agrônômicos (Brasil, 2024), há preocupações quanto à redução futura da produtividade, diante dos impactos das mudanças climáticas. Caso não sejam implementadas políticas e investimentos adequados, esses desafios poderão comprometer significativamente a produtividade agrícola e a segurança alimentar do país (Silva e Pereira, 2023).

No Brasil, as usinas térmicas movidas a combustíveis fósseis são usadas para garantir o fornecimento de energia aos consumidores quando as usinas renováveis (hídrica, eólica e solar) não estão gerando energia. Isso ocorre quando há um menor nível de chuvas, o que reduz a vazão das hidrelétricas; quando há diminuição da intensidade dos ventos; ou quando há redução da geração fotovoltaica, em dias chuvosos ou à noite (Casarin, 2024).

A geração de energia a partir de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, produzida em usinas termelétricas, utiliza recursos finitos e contribui para a emissão de gases de efeito estufa (Rodrigues, 2022).

Para compreender de forma abrangente o potencial da utilização do CO<sub>2</sub> como matéria-prima para impulsionar a descarbonização dos processos industriais e agroindustriais (especialmente, na geração de energia), é fundamental considerar uma série de fatores inter-relacionados. Entre eles, destacam-se os aspectos termodinâmicos e cinéticos das reações envolvidas, a viabilidade técnico-econômica das tecnologias aplicadas, a integração eficiente dos processos industriais, além da sustentabilidade ambiental e da adoção dos princípios da química verde (Barecka, 2021).

Os doze princípios da química verde oferecem diretrizes para o desenvolvimento de processos e produtos químicos sustentáveis (Andrade, 2025): prevenção; economia de átomos; sínteses menos perigosas; *design* de produtos químicos mais seguros; solventes e auxiliares mais seguros; eficiência energética; matérias-primas renováveis; redução de derivados; catálise; *design* para degradação; análise em tempo real, para a prevenção da poluição; e química inerentemente mais segura.

A utilização do CO<sub>2</sub> como matéria-prima representa uma estratégia promissora para a mitigação de GEE. Além de contribuir para a redução das emissões, o aproveitamento do CO<sub>2</sub> agrega valor ao transformar um subproduto industrial em insumo para diversos setores, como o químico e o agropecuário, destacando-se a síntese de nanocarbonatos como um exemplo relevante dessa aplicação (Souza, 2022).

A produção de compostos químicos a partir do CO<sub>2</sub> configura-se como uma abordagem inovadora e com grande potencial de integração no contexto das tecnologias de captura e utilização de carbono CCU. Esse conceito é explorado no âmbito do projeto Agricarbono, uma colaboração entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e Eletrobras, atualmente denominada Axia Energia. O projeto buscou não apenas desenvolver processos de captura, mas também valorizar o CO<sub>2</sub> capturado por meio de sua conversão em produtos de interesse industrial e agrícola (Vaz Jr. *et al.*, 2020).

Embora muitos estudos tenham avaliado os impactos ambientais das termoeletricas (Organização das Nações Unidas, 2025) utilizando a avaliação do ciclo de vida, este estudo se destaca ao empregar as emissões de CO<sub>2</sub> na síntese do NCC e sua aplicação na agricultura. Essa abordagem inovadora não apenas avalia o desempenho ambiental do uso do CO<sub>2</sub> como matéria-prima, mas também discute, de forma exploratória, seu potencial econômico e o papel do NCC como insumo agrícola, oferecendo vantagens como alta reatividade e rápida neutralização da acidez do solo.

Discussões recentes em fóruns globais sobre clima, em especial, a 30ª Conferência das Nações Unidas sobre mudança climática (COP30, 2025), realizada em Belém do Pará, entre 10 e 21 de novembro de 2025, reforçam a necessidade de soluções que conciliem mitigação das emissões, desenvolvimento econômico e segurança alimentar, com atenção especial à Amazônia e aos sistemas agrícolas tropicais (UNFCCC, 2025). Assim, este trabalho contribui para a consolidação de práticas sustentáveis na indústria e na agricultura, preenchendo uma lacuna na literatura ao correlacionar diretamente a tecnologia de captura de CO<sub>2</sub> com a produção de insumos de alto valor agregado (Kazanç *et al.*, 2024).

O projeto Agricarbono foi dividido em duas fases: a laboratorial e a piloto. Até o presente momento, foram coletados dados da fase laboratorial e dados referentes ao uso do produto em casa de vegetação. A intenção é utilizar os resultados da ACV para orientar futuras fases-piloto do projeto, contribuindo na definição de cenários e na tomada de decisões estratégicas (Vaz Jr. *et al.*, 2021).

O nanocarbonato é uma forma de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) constituída por partículas com dimensões inferiores a 100 nm, denominado nanocarbonato de cálcio (NCC). Segundo Vaz Jr. (2021), essa nanotecnologia confere ao CaCO<sub>3</sub> maior reatividade, aumento da área superficial e melhores características de dispersão, o que o torna significativamente mais eficiente para diversas aplicações, em comparação ao calcário convencional, principal constituinte de rochas sedimentares. O objetivo principal do NCC é substituir o calcário comercial no uso na agrícola, cuja produção e aplicação estão associadas a elevada pegada de carbono.

A pegada de carbono é um indicador que quantifica, em termos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), a soma das emissões de gases de efeito estufa geradas direta e indiretamente por um produto, serviço ou processo, considerando todas as fases de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (Yang *et al.*, 2019).

Essa métrica desempenha papel fundamental na identificação dos principais *hotspots* de emissões, permitindo a avaliação detalhada dos impactos ambientais e servindo como base para

a definição de estratégias de mitigação e políticas de transição para uma economia de baixo carbono (Nordelöf *et al.*, 2019).

O uso do dióxido de carbono como matéria-prima é uma alternativa promissora para a redução de GEE. O CO<sub>2</sub> possui valor agregado que pode beneficiar diversos setores da agricultura até a indústria, com a produção de NCC. A obtenção de nanocarbonatos oferece novas oportunidades promissoras no setor de captura de CO<sub>2</sub> com o uso de métodos sustentáveis e economicamente viáveis (Berahim *et al.*, 2019).

Seguindo as recomendações da ABNT, que define um sistema de produto como o “conjunto de processos elementares, incluindo fluxos de materiais e produtos, que desempenham uma ou mais funções específicas e representam o ciclo de vida de um produto” (ABNT, 2009), esta tese adota uma abordagem integrada de ACV para dois níveis de análise complementares: no primeiro, é avaliada a produção de NCC em escala laboratorial (NCClab), com abordagem “do berço ao portão”, abrangendo desde a extração de insumos e a captura de CO<sub>2</sub> até a disponibilização do NCC como produto na saída do sistema de produção; no segundo, são construídos cenários agrícolas “do berço ao campo” para sistemas de soja e alface nos quais o NCC, em uma rota otimizada para uso em campo (NCCopt), é comparado ao calcário convencional como corretivos de acidez do solo, incluindo etapas de produção, transporte, aplicação e emissões associadas ao uso no solo (Hasler, 2015).

Nesse escopo ampliado, a ACV não se limita à pegada de carbono da síntese do NCC, mas incorpora categorias adicionais de impacto relevantes para a agricultura, como toxicidade humana, ecotoxicidade, eutrofização, uso da água, uso da terra e formação de material particulado, em linha com métodos de impacto amplamente aceitos na literatura, como IPCC 2013 e ReCiPe 2016 Midpoint (H) (openLCA 2016). Ao integrar esses resultados com indicadores agrônômicos (produtividade, efeito do valor de pH do solo, captura de CO<sub>2</sub> biogênico em biomassa e variação do carbono no solo –  $\Delta$ SOC), busca-se discutir o papel do NCC no contexto da economia circular e da descarbonização da agricultura (Leifeld, 2022).

De forma a refletir as condições reais de manejo, esta tese considera quatro cenários principais de correção da acidez do solo em sistemas agrícolas de soja e alface: (i) sem calagem, representando um cenário de referência com solo ácido; (ii) com calcário comercial, caracterizando o manejo convencional; (iii) com NCClab, associado à aplicação de NCC produzido em escala laboratorial e testado na alface em casa de vegetação; e (iv) com NCCopt, representando um cenário prospectivo de uso de um NCC otimizado para aplicação em campo. Esses cenários são comparados em termos de impactos ambientais por unidade funcional de produto agrícola, permitindo avaliar em que condições o NCC pode constituir uma alternativa

ambientalmente robusta ao calcário tradicional e quais *trade-offs* emergem quando se considera todo o ciclo “do berço ao campo”.

Com base nesses cenários, esta tese se orienta pelas seguintes hipóteses (H1, H2 e H3) de trabalho:

- H1: O uso de NCC otimizado, avaliado em abordagem do berço ao campo, reduz a pegada de carbono da calagem por unidade de produto agrícola, quando comparado ao manejo convencional com calcário?
- H2: A rota laboratorial de produção (NCClab) apresenta impactos ambientais suficientemente elevados para ser considerada apenas como referência experimental, e não como alternativa tecnológica viável em escala de campo?
- H3: A inclusão da captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa e do aumento de carbono orgânico do solo ( $\Delta$ SOC) pode melhorar o balanço climático dos cenários com correção da acidez do solo (calcário e NCC), a ponto de justificar sua consideração em análises de créditos de carbono?

O ineditismo deste estudo reside na integração, em um mesmo marco metodológico, de: (i) uma rota de captura e uso de CO<sub>2</sub> para síntese de NCC a partir de emissões de CO<sub>2</sub> de usinas termoelétricas; (ii) a aplicação comparativa desse NCC e do calcário comercial em sistemas agrícolas tropicais de soja e alface, em abordagem de ACV do berço ao campo; e (iii) a inclusão explícita da captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa e de cenários de variação do carbono orgânico do solo, articulados com faixas de preços de mercado de carbono. Essa combinação permite avaliar, de forma original, o papel do NCC como insumo potencialmente alinhado à descarbonização simultânea dos setores de energia e de produção de alimentos.

---

## 2. OBJETIVOS

---

Os objetivos gerais deste trabalho são desenvolver e aplicar uma abordagem integrada de ACV para quantificar e comparar os impactos ambientais da produção de NCC via captura e uso de CO<sub>2</sub>, e avaliar o potencial uso do NCC como corretivo de acidez do solo, com validação em alface em casa de vegetação e modelagem de cenários agrícolas para soja e alface em abordagem do berço ao campo, no contexto da economia circular e da mitigação de GEE.

Os objetivos específicos são:

- Revisar a literatura sobre ACV, captura e uso de CO<sub>2</sub>, produção de carbonatos de cálcio e calagem de solos agrícolas;
- Modelar o inventário do ciclo de vida e calcular os impactos ambientais da produção de NCC em escala laboratorial (NCClab), em escopo berço ao portão;
- Propor um cenário de processo otimizado para produção de NCC (NCCopt) e comparar seu desempenho ambiental com o do NCClab e do calcário agrícola;
- Definir e modelar quatro cenários de manejo da acidez do solo em sistemas de cultivo soja e alface (sem calagem, com calcário, com NCClab e com NCCopt), em escopo berço ao campo;
- Quantificar e comparar os impactos ambientais dos cenários agrícolas nas principais categorias de impacto — por exemplo: aquecimento global, uso de recursos, toxicidades (carcinogênicas), ecotoxicidade, uso da água, uso da terra e formação de material particulado);
- Identificar os principais *hotspots* de emissões e consumo de recursos na cadeia de produção do NCC e nos sistemas agrícolas avaliados;
- Discutir as implicações dos resultados para a descarbonização da agricultura, a economia circular do carbono, e o uso do NCC em estratégias e instrumentos de mitigação climática.

---

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O berço e o fim (túmulo) de uma civilização estão diretamente relacionados com o seu avanço tecnológico e o uso correto dos recursos naturais (produção de alimentos e o uso de matérias-primas) disponíveis, de forma sustentável. “Toda civilização nasce da ordem, cresce com a liberdade e morre pelo caos.” – Will Durant, *The story of civilization* (Simms, 2013).

A história humana está diretamente ligada e correlacionada à extração e transformação de recursos naturais. O berço da agroindústria (produção de alimentos) e a indústria de processos (processos de transformação) estão relacionados com progresso e desenvolvimento da consciência individual e coletiva.

Nos últimos 175 anos de desenvolvimento humano, destacou-se o rápido crescimento da população mundial, acompanhado de revoluções industriais — como é o caso da indústria 4.0, tradicionalmente definida como a integração de tecnologias digitais avançadas, como sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of things*), inteligência artificial e computação em nuvem, para otimizar e automatizar processos produtivos (Zhou, 2015). No intervalo de tempo entre 1850 e 2025, pode ser observado o crescimento exponencial da população, estimada em 1,2 bilhão de pessoas (1850), e segue até os dias atuais, com a população mundial atingindo 8 bilhões em 15 de novembro de 2022 (Barecka, 2021). Ao longo dessa linha do tempo, os marcos tecnológicos e as inovações impulsionaram o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial (Organização das Nações Unidas, 2025).

A civilização humana ou a população mundial estimada em 11 de julho de 2025 (Dia mundial da população), de acordo com a *UN-World population prospects*, é de aproximadamente 8,2 bilhões de pessoas (United Nation, 2025).

Projeções indicam que a população mundial continuará crescendo nas próximas décadas, podendo alcançar 10,3 bilhões por volta da década de 2080, antes de começar a diminuir gradualmente (Morán, 2024).

Com o crescimento das civilizações, surgiram as nações e, com elas, teve origem a era industrial, resultando no aumento das emissões de poluentes diversos. Os registros e relatórios climáticos têm como base de nível pré-industrial o período correspondente entre 1850 e 1900 (Copernicus Climate Change Service, 2025).

Desde a primeira revolução industrial, o crescimento das emissões de GEE tem sido exponencial. A queima de combustíveis fósseis para obtenção de energia é responsável por cerca de 75 % das emissões globais de dióxido de carbono (Ministério da ciência, tecnologia e

inovação, 2024). O setor energético lidera esse processo, ainda que, no Brasil, a matriz energética mais limpa, com forte presença de energia hidrelétrica, reduza parcialmente a dependência de fontes fósseis. No entanto, setores como transporte, indústria e usinas termelétricas continuam contribuindo significativamente para as emissões nacionais (Ministério da ciência, tecnologia e inovação, 2024).

Eventos históricos, como as guerras mundiais (1914-1918 e 1939-1945), e a grande depressão de 1929, causaram quedas temporárias nas emissões globais (World resources institute Brasil, 2023). Porém, após 1950, iniciou-se uma retomada industrial intensa, elevando rapidamente os níveis de emissão, de 4 para 6 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> entre 1945 e 1950, com aumentos contínuos nas décadas seguintes (BBC News Brasil, 2021).

Para contextualizar a contribuição dos diferentes gases de efeito estufa, a Tabela 1 apresenta uma síntese de suas principais fontes de emissão, do poder de aquecimento global em 100 anos (GWP100) e da permanência típica na atmosfera, com base em Filonchyk *et al.*, (2024).

**Tabela 1** – Principais gases de efeito estufa (GEE): fontes, poder de aquecimento e permanência na atmosfera.

| GEE                                                                | Principais fontes                                                                                                                                                                                        | Poder de aquecimento*                                                               | Permanência na atmosfera     |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| CO <sub>2</sub><br>(Dióxido de carbono)                            | Queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), desmatamento, processos industriais etc.                                                                                                | Unidade de referência para os demais GEE                                            | Centenas de anos             |
| CH <sub>4</sub><br>(Metano)                                        | Pecuária (fermentação entérica do gado), decomposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários (CH <sub>4</sub> biogênico), mineração de carvão e extração de petróleo e gás (CH <sub>4</sub> fóssil) | Aproximadamente 23 vezes mais potente que o CO <sub>2</sub> , ao longo de 100 anos  | Cerca de 12 anos             |
| N <sub>2</sub> O<br>(Óxido nitroso)                                | Uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura, processos industriais e queima de biomassa e combustíveis fósseis                                                                                      | Cerca de 296 vezes maior que o CO <sub>2</sub> , em um período de 100 anos          | Mais de 100 anos             |
| HFCs, PFCs, SF <sub>6</sub> , NF <sub>6</sub><br>(Gases fluorados) | Uso de espumas isolantes, gases em refrigeradores, condicionadores de ar e processos industriais                                                                                                         | Extremamente alto, podendo ser milhares de vezes mais potente que o CO <sub>2</sub> | Variável, de anos a milênios |

Fonte: Filonchyk *et al.*, (2024).

Entre esses gases, o dióxido de carbono e o óxido nitroso merecem destaque neste trabalho, tanto pela sua relevância nas emissões globais quanto pelo papel central que desempenham na proposta de mitigação, por meio da captura e aplicação agrícola de CO<sub>2</sub>.

### 3.1 Emissões líquidas totais antropogênicas de GEE, de 1990 a 2024

As emissões líquidas antropogênicas de GEE têm aumentado significativamente ao longo das últimas décadas, refletindo o crescimento da atividade industrial, da demanda energética e da expansão das economias globais. O setor agropecuário e o desmatamento também contribuem no aumento das emissões de GEE. No cenário brasileiro, essas atividades têm impacto significativo: o desmatamento libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e compromete os sumidouros naturais, enquanto a agropecuária contribui notoriamente por meio das emissões de metano (CH<sub>4</sub>) decorrentes da fermentação entérica e do manejo de dejetos animais. Embora a matriz energética do Brasil seja predominantemente renovável, com forte ênfase na energia hidrelétrica, os desafios relacionados ao desmatamento e às práticas agrícolas intensivas continuam a representar uma parcela expressiva das emissões nacionais (Ministério do Meio Ambiente, 2024; United Nations Environment Programme, 2024).

Os dados a seguir, extraídos do *Relatório do programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente* (United Nations Environment Programme, 2025), demonstram a evolução dessas emissões em gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO<sub>2e</sub>):

- 1990: 37,8 GtCO<sub>2e</sub> – Início da série histórica, refletindo as emissões antes dos primeiros grandes acordos climáticos;
- 2000: 41,5 GtCO<sub>2e</sub> – Aumento gradual, associado ao crescimento industrial e energético;
- 2010: 51,0 GtCO<sub>2e</sub> – Expansão significativa, impulsionada pelo consumo de combustíveis fósseis e pela urbanização acelerada;
- 2020: 53,7 GtCO<sub>2e</sub> – Patamar elevado, com leve desaceleração devido à pandemia da Covid-19;
- 2023: 57,1 GtCO<sub>2e</sub> – Novo recorde, evidenciando a retomada econômica pós-pandemia e os desafios para a mitigação climática.

As consequências do aumento das emissões de GEE refletem-se diretamente na elevação da temperatura da superfície global, que já estava, em média, 1,43 °C (1,32 a 1,53 °C) acima dos níveis pré-industriais (1850-1900) no ano de 2023. Observações mais recentes, como as de 2024, indicam que o aquecimento ultrapassou momentaneamente a marca de 1,5 °C, superando o limite estabelecido no acordo de Paris para conter os impactos mais severos das mudanças climáticas. A média estatística, calculada a partir de vários conjuntos de dados climáticos independentes — denominados *multi-dataset* — está apresentada na Figura 1. Isso é semelhante à estimativa de 1,45 °C, confirmada de seis outros conjuntos de dados citados no relatório estado do clima global 2024, da Organização Meteorológica Mundial (de 1,33 °C a 1,57 °C).

**Figura 1** – Média anual (linha fina) e décadas (linha grossa) da temperatura da superfície global, expressas como uma mudança de temperatura do período de referência de 1850-1900.



**Fonte:** Adaptado do relatório sobre a lacuna de emissões  
(United Nations Environment Programme, 2025).

O aumento de 1,3 % nas emissões globais de GEE, em 2023 (em comparação a 2022), superou a média da década anterior à pandemia (2010-2019), que foi de 0,8 % ao ano. O relatório sobre a lacuna de emissões 2024, das nações unidas, adverte que, sem políticas adicionais mais ambiciosas, o mundo pode alcançar um aquecimento de até 3,1 °C. Para limitar o aquecimento a 1,5 °C, seria necessária uma redução de 42 % das emissões até 2030, e de 57 % até 2035 (United Nations Environment Programme, 2025).

No contexto brasileiro, a situação é ainda mais grave, considerando fatores como o desmatamento acelerado, a degradação dos sumidouros naturais e desafios na gestão da matriz energética. Esses elementos indicam que o aquecimento no Brasil pode superar as projeções globais, reforçando a urgência de medidas robustas de mitigação e adaptação para evitar impactos ambientais. Entretanto, os dados do Copernicus climate change Service indicam que a temperatura média global ultrapassou momentaneamente esse limite, em 2023 e 2024, sugerindo que o cenário para manter o aquecimento abaixo de 1,5 °C se torna cada vez mais desafiador (United Nations Environment Programme, 2025). Essa aparente “ultrapassagem” reforça a urgência de ações mais efetivas e imediatas, tanto em mitigação quanto em adaptação, pois a meta estabelecida no acordo de Paris pode não ser mais suficiente para conter os efeitos mais graves das mudanças climáticas.

O Brasil possui papel relevante no cenário global de emissões, sobretudo em razão da contribuição do setor de mudança de uso da terra e de emissões associadas à agropecuária. No contexto internacional, o *emissions GAP report 2025* (United Nations Environment Programme, 2025), destaca a concentração das emissões globais em poucos grandes emissores e reforça a necessidade de aceleração das políticas de mitigação. No âmbito nacional, as estimativas oficiais divulgadas em portais institucionais de mitigação indicam a importância de monitoramento contínuo das emissões e do aperfeiçoamento de instrumentos de redução setorial. Em 2023, o país registrou um aumento de 0,1 % em relação a 2022, atingindo 6 tCO<sub>2</sub>e *per capita* (Ministério do Meio Ambiente, 2024). Esses dados evidenciam a relevância do Brasil no cenário global de emissões e a necessidade de estratégias de mitigação e adaptação, conforme ilustrado na Tabela 2.

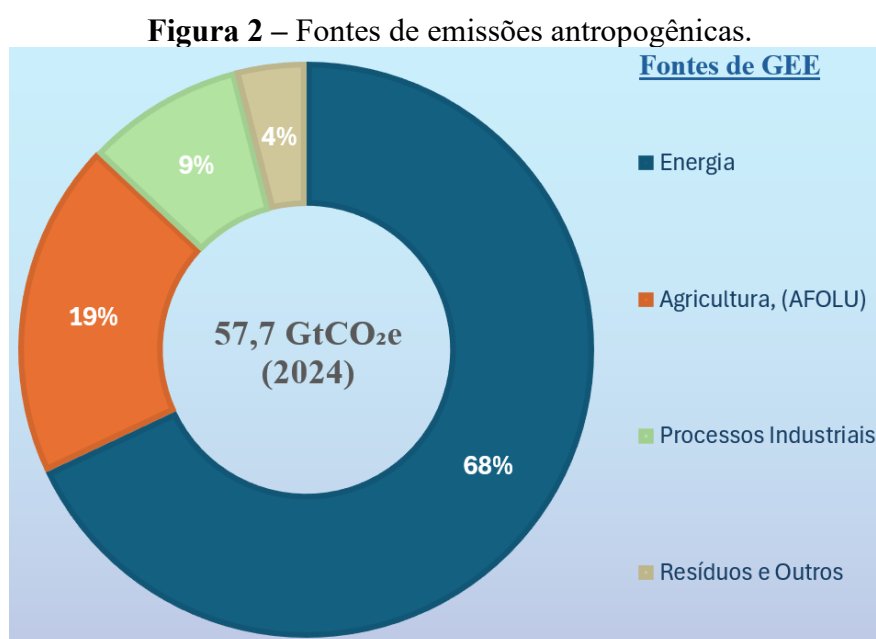
**Tabela 2** – Emissões totais, *per capita* e históricas de gases de efeito estufa (GEE) de países e regiões selecionados.

| País/Região                 | Emissões totais de GEE em 2024 | Mudança nas emissões totais de GEE 2023-2024 | Emissões <i>per capita</i> de GEE em 2024 |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Unidade                     | GtCO <sub>2</sub> e            | (%)                                          | tCO <sub>2</sub> e <i>per capita</i>      |
| China                       | 15,60                          | 0,50                                         | 11                                        |
| Estados Unidos              | 5,90                           | 0,10                                         | 17,4                                      |
| Índia                       | 4,40                           | 3,60                                         | 3,0                                       |
| União Europeia (27 membros) | 3,20                           | -2,10                                        | 7,1                                       |
| Federação Russa             | 2,60                           | 2,30                                         | 17,9                                      |
| Indonésia                   | 1,30                           | 4,60                                         | 4,6                                       |
| Mundo                       | 57,70                          | 1,05                                         | 6,4                                       |

**Fonte:** United Nations Environment Programme – UNEP (2025).

### 3.2 Fontes das emissões

As fontes de emissões totais de GEE, que chegaram, em 2024, globalmente, a 57,7 GtCO<sub>2</sub>e, de acordo com a publicação do Programa das Nações unidas para o meio ambiente, UNEP (do inglês, *United Nations Environment Programme*), em 2025, são provenientes, em sua grande maioria, da produção de energia (68 %), agricultura, de florestas e outros usos das terras — AFOLU (do inglês, *Agriculture, forestry and other land use*) (19 %), processos industriais (9 %), e resíduos/outras (4 %), e estão representadas na Figura 2.



**Fonte:** Adaptado do relatório do programa das nações unidas para o meio ambiente (United Nations Environment Programme 2025).

Segundo o programa das nações unidas para o meio ambiente (2024), o setor energético representa a maior parcela das emissões globais de GEE, correspondendo a 68 % do total. Essas emissões estão associadas a geração de eletricidade, transporte, produção de combustíveis e consumo energético em edificações e indústrias:

- 27 % são provenientes da geração de energia elétrica, incluindo usinas termelétricas movidas a carvão, gás e petróleo;
- 15 % são oriundos do transporte, subdivididos em:
  - 11 % relacionados ao transporte rodoviário (veículos movidos a combustíveis fósseis);

- 2 % relacionados à aviação;
- 2 % referentes a outros meios de transporte (marítimo, ferroviário e fluvial);
- 11 % atribuídos à produção industrial, que consome grandes quantidades de energia;
- 6 % resultantes do uso de energia em construções e edificações, incluindo aquecimento, resfriamento e iluminação;
- 10 % advindos da produção de combustíveis, segmentados em:
  - 3 % de emissões provenientes da extração e do refino de petróleo e gás;
  - 4 % vindos de combustíveis sólidos (como carvão mineral);
  - 3 % da energia usada na produção de outros combustíveis.

O setor agrícola e as mudanças no uso da terra são responsáveis por 19 % das emissões globais. As principais fontes dessas emissões incluem:

- 11 % da agricultura, subdivididos em:
  - 6 % associadas à pecuária, incluindo fermentação entérica e manejo de dejetos animais;
  - 5 % resultantes da queima de biomassa, emissões de solos agrícolas e do cultivo de arroz;
- 8 % das mudanças no uso da terra e das florestas (AFOLU): relacionadas ao desmatamento, à degradação florestal, e à conversão de terras para agricultura e pecuária.

As emissões geradas por processos industriais, sem relação direta com a queima de combustíveis, representam 9,5 % das emissões globais, distribuídas da seguinte forma:

- 3 % provenientes da produção de cimento (excluindo carbonatação);
- 2 % gerados pela produção de produtos químicos, como fertilizantes, plásticos e gases industriais;
- 0,5 % da extração de metais ferro, aço e alumínio;
- 4 % associados a outros processos industriais que envolvem reações químicas emissoras de gases de efeito estufa.

A gestão de resíduos contribui com 4,0 % das emissões globais de GEE, provenientes principalmente, da decomposição de matéria orgânica e do tratamento de efluentes:

- 4,0 % resultantes do manejo de resíduos diversos, incluindo aterros sanitários e efluentes líquidos.

De acordo com o sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa (SEEG), do Ministério do Meio Ambiente, o setor de uso do solo, que inclui agropecuária e mudanças no uso da terra, é responsável por aproximadamente 46 % das emissões nacionais com 1,062 GtCO<sub>2</sub>e — uma contribuição muito superior à média global, de 18 %, (Observatório do clima, 2025). Essa elevada porcentagem se deve, em grande parte, ao desmatamento, à degradação florestal e às emissões decorrentes da pecuária, como a fermentação entérica e o manejo de dejetos (Ministério do Meio Ambiente, 2024).

### **3.3 Acordo de Paris**

Com o objetivo de reunir esforços internacionais para conter o aquecimento global, o acordo de Paris foi firmado em 2015. Para que as metas de limitação do aumento da temperatura estabelecidas pelo acordo sejam cumpridas, as emissões globais de GEE deverão ser reduzidas drástica e rapidamente (Prolo *et al.*, 2021). Estimativas indicam que é necessário que todas as emissões de GEE sejam compensadas com remoções simultâneas, de forma que as emissões líquidas sejam nulas em 2050 e negativas a partir de então (Rogelj *et al.*, 2018). Para alcançar a redução efetiva das emissões de GEE e cumprir as metas do acordo de Paris, é imprescindível revisar e aprimorar os modelos de avaliação de impactos ambientais.

### **3.4 COP30 na Amazônia e a descarbonização da agricultura brasileira**

A agenda oficial da COP30 enfatizou temas como bioeconomia, soluções baseadas na natureza e transição justa na Amazônia, com iniciativas voltadas para a ampliação de investimentos em cadeias produtivas sustentáveis e em sistemas alimentares de baixo carbono. Nesse quadro, tecnologias de CCU associadas à produção de insumos agrícolas ganharam relevância por conectarem mitigação de emissões industriais, valorização de resíduos e melhoria da eficiência no uso de corretivos de solo. Assim, o escopo desta pesquisa dialoga diretamente com a agenda pós-COP30 ao propor uma rota tecnológica que integra

descarbonização da indústria, intensificação sustentável da agricultura e princípios de economia circular (Artaxo, 2025).

Nesse contexto, a agricultura assume papel central, tanto como fonte de emissões (mudança de uso da terra, emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo, metano da pecuária e emissões associadas a insumos) quanto como potencial sumidouro de carbono por meio do aumento de estoque de Carbono Orgânico do Solo ( $\Delta\text{SOC}$ ), e da adoção de insumos e tecnologias de menor pegada de carbono.

### **3.5 Geração de energia em termelétricas e emissões de $\text{CO}_2$**

No Brasil, embora a matriz elétrica seja predominantemente renovável, com participação majoritária de hidrelétricas e expansão recente de fontes eólica e solar, a geração termelétrica continua desempenhando papel estratégico na complementação da oferta de energia, sobretudo em períodos de estiagem e em situações de aumento da demanda (Empresa de pesquisa energética, 2025). Entre as termelétricas a carvão mineral, destacam-se complexos instalados próximos a grandes reservas carboníferas, como a usina Candiota III, operada pela Eletrosul, no Rio Grande do Sul, que figura entre as principais fontes de emissões de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{tCO}_2\text{e}$ ) do setor elétrico brasileiro, com contribuição relevante para a categoria de mudança do clima em avaliações ambientais (International energy agency, 2024). Os gases de chaminé dessas usinas apresentam concentrações de  $\text{CO}_2$  significativamente superiores às do ar atmosférico, caracterizando fontes concentradas adequadas à aplicação de tecnologias de captura e uso de carbono (CCU). Esse contexto evidencia a importância de modelos de avaliação de impactos ambientais capazes de representar adequadamente emissões e processos em diferentes realidades regionais.

### **3.6 Fundamentos e evolução dos modelos para avaliação de impactos**

Embora os modelos de avaliação de impactos ambientais no contexto da avaliação do ciclo de vida (ACV) tenham se consolidado a partir da década de 1980, os avanços metodológicos e as atualizações vêm se intensificando, com esforços recentes de harmonização de indicadores e refinamentos nos modelos de quantificação de impactos, incluindo abordagens com maior detalhamento temporal (Lang-Quantzendorff *et al.*, 2025).

Estudos recentes têm destacado a importância de integrar dados atualizados e regionalizados para refinar os inventários e os modelos de impacto. Por exemplo, Yang *et al.*,

(2019) realizaram uma comparação entre diferentes tipos de baterias em dispositivos eletrônicos, identificando que a produção da bateria é o principal *hotspot* ambiental desses produtos; Nordelöf *et al.*, (2019) desenvolveram um modelo escalável para o inventário do ciclo de vida de um inversor eletrônico para veículos elétricos, contribuindo para o preenchimento de lacunas de dados e para a precisão das análises de impacto.

### 3.7 Justificativas para a padronização da avaliação de impactos e a ACV

A grande quantidade de artigos científicos, estudos e trabalhos usando a avaliação de ciclo de vida mostra que eles são, aparentemente, semelhantes, mas trazem conclusões diferentes, devido às considerações feitas, referentes a fronteiras e limites adotados, à idade dos dados, à tecnologia usada e disponível, à logística de abastecimento de matérias-primas, aos tipos de transporte e à matriz energética, que são fatores críticos para os parâmetros do inventário (Coltro *et al.*, 2007).

Estudos divergiam até na interpretação do que seria considerado o sistema ambientalmente mais adequado. Mesmo diante dessas restrições metodológicas, publicaram-se análises comparativas que exerceram influência significativa no mercado de produtos concorrentes (Coltro *et al.*, 2007). Uma limitação bem conhecida é que muitos desses estudos utilizam dados inventariados por órgãos internacionais, como o *Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas 2006* (IPCC, do inglês *Intergovernmental panel on climate change*), os quais raramente refletem a realidade tropical. Por isso, a incorporação de dados locais é essencial para aprimorar a relevância e a acurácia das análises de impacto ambiental, especialmente em países como o Brasil.

Dessa forma, tornou-se necessária a padronização da metodologia de ACV. Nesse cenário, a SETAC (do inglês, *Society of environmental toxicology and chemistry*) desempenhou papel importante, ao reunir pesquisadores de destaque em aproximadamente nove conferências internacionais realizadas entre 1990 e 1993. Esse esforço colaborativo culminou na publicação do documento *SETAC Guidelines for life cycle assessment – A code of practice* (Consoli *et al.*, 1993), o primeiro instrumento voltado para a padronização da metodologia de ACV, o qual mais tarde serviu de base para os trabalhos de normalização internacional conduzidos pela ISO (do inglês, *International organization for standardization*) (Consoli *et al.*, 1993).

### 3.8 Normas ISO relacionadas à avaliação do ciclo de vida

As normas da série ISO 14040:2006 foram criadas para padronizar a ACV e garantir maior confiabilidade nos estudos ambientais. A seguir, são apresentadas as principais normas e suas datas de publicação:

- Os esforços de normalização internacional da ACV pela ISO envolveram mais de 300 especialistas, de cerca de 29 países, que atuaram direta ou indiretamente na padronização e geraram a série de normas ISO 14040:2006 (Coltro *et al.*, 2007). Como exemplo, temos a ISO/TR 14049 – *Environmental management – Life cycle assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* (2000).
- No Brasil, a norma internacional ISO 14040 foi adotada como norma nacional pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resultando na ABNT NBR ISO 14040:2001, elaborada no âmbito do Subcomitê de avaliação do ciclo de vida (SC-05) do Comitê brasileiro de gestão ambiental (ABNT/CB-38).
- Com a adoção, no Brasil, das normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009, a norma ABNT NBR ISO 14040 passou por revisão, enquanto as normas ABNT NBR ISO 14041:2004, ABNT NBR ISO 14042:2004 e ABNT NBR ISO 14043:2005 foram canceladas e substituídas pelas novas edições. Essas atualizações visam garantir maior coerência metodológica e alinhamento com padrões internacionais na avaliação do ciclo de vida (Coltro *et al.*, 2007).

### 3.9 Definição da avaliação do ciclo de vida

A ACV é uma ferramenta quantitativa que permite mensurar os impactos ambientais de um produto ou processo durante todas as etapas de seu ciclo, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (Yang *et al.*, 2019). Essa abordagem integrada é fundamental para subsidiar decisões que visam a redução dos impactos ambientais e a promoção da sustentabilidade (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

### 3.9.1 Aplicações da ACV

Com as normas de ACV definidas, foram elaborados vários estudos que tratam sobre diferentes aplicações da ACV (Tabela 3) os quais foram desenvolvidos para atender a contextos específicos de aplicação em diversos setores, como produtos, energia, infraestrutura/construção e cidades (Battistelle *et al.*, 2020).

**Tabela 3** – Relação dos diferentes tipos de ACV e uma breve revisão bibliográfica sobre esses exemplos.

| Tipo de ACV                      | Aplicações                                                                                                                     | Exemplo de estudo                                                                                                                                                                                         | Referências                        |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| ACV de Produtos                  | Avaliação de bens de consumo, eletrônicos, materiais de construção, embalagens e processos industriais                         | Um estudo sobre a produção de bioquerosene a partir de resina mostrou que o combustível pode reduzir em até 83,21 % as emissões de gases de efeito estufa em comparação com o querosene fóssil            | Briceño (2019)                     |
| ACV Energético                   | Comparação entre fontes de energia renováveis e fósseis, otimização da eficiência energética e redução da pegada de carbono    | Um estudo comparou o consumo energético necessário para elevar o padrão de vida na Índia e no Brasil, demonstrando como a ACV pode ser usada para planejar a demanda energética sustentável nesses países | Rao <i>et al.</i> , (2018)         |
| ACV Infraestrutura e Construções | Avaliação de materiais de construção, impacto ambiental de edifícios e rodovias, análise de eficiência energética em operações | Um estudo analisou a pegada ambiental de diferentes tipologias de edifícios residenciais no Brasil, destacando que a fase operacional tem o maior impacto ambiental                                       | Evangelista <i>et al.</i> , (2018) |
| ACV Cidades                      | Planejamento urbano sustentável, otimização de sistemas de transporte e gestão de resíduos sólidos                             | Um estudo no Rio de Janeiro utilizou ACV para avaliar diferentes estratégias de gestão de resíduos sólidos urbanos, destacando a importância da coleta seletiva para reduzir impactos ambientais          | Coelho e Lange (2018)              |

**Fonte:** Elaboração própria, com base em Briceño (2019), Rao *et al.*, (2018), Evangelista *et al.*, (2018) e Coelho e Lange (2018).

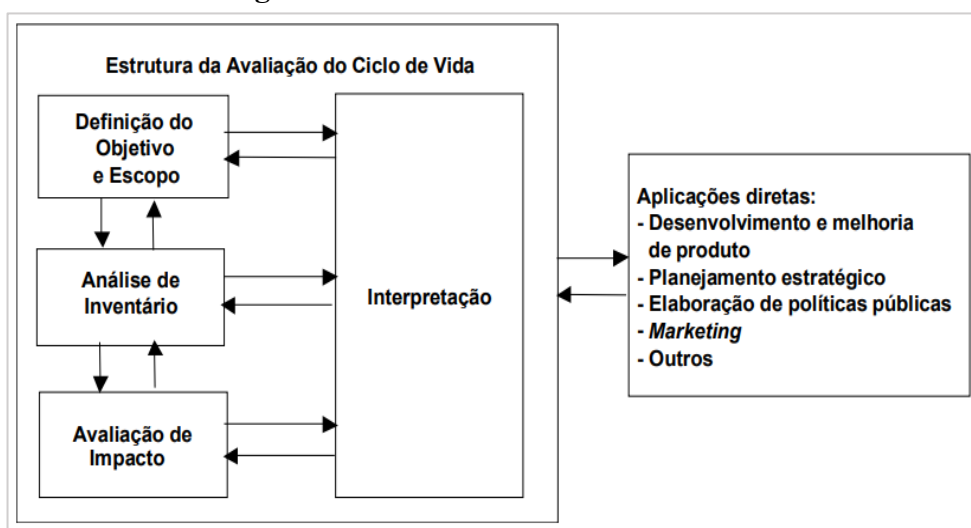
### 3.9.2 Fases da ACV

A estrutura de uma ACV se divide em quatro fases principais (Figura 3): definição do objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impacto, e interpretação.

De acordo com a norma ISO 14040 (2006), um estudo de ACV é composto por quatro fases interdependentes, que devem ser conduzidas de forma consistente e iterativa:

- Definição e escopo: nesta fase, o objetivo é verificar o estudo, as considerações gerais do sistema, a função e a unidade funcional, as fronteiras do sistema, além de descrever o sistema usando um fluxograma. Também ocorrem a adequação do uso do *software* e as demais escolhas metodológicas, definindo o objetivo da ACV;
- Análise do inventário — também denominada inventário do ciclo de vida (ICV): é a adaptação dos dados de entrada e saída (unidades e coleta de dados secundários, e seleção dos bancos de dados do inventário);
- Avaliação de impacto ou avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV): nesta etapa, definem-se as categorias de impactos, os indicadores da categoria, e os modelos de caracterização e sua classificação;
- Interpretação: nesta fase, são realizados os ajustes das fases da ACV, a redefinição dos objetivos, a verificação das entradas de massas, energias e a sua significância ambiental no inventário, bem como a identificação de gargalos de simulações de cenários alternativos às mudanças realizadas.

**Figura 3** – Fase de um estudo de ACV.



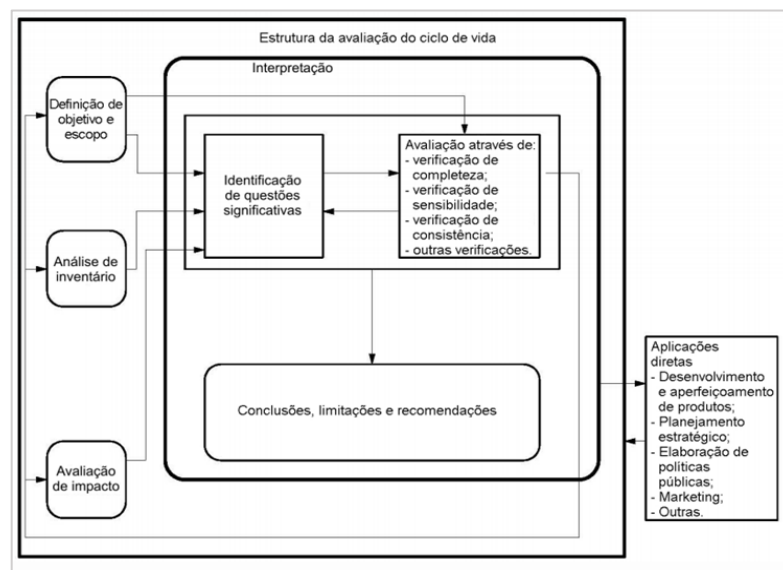
Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2006.

As aplicações diretas das interpretações no processo de produção e dos resultados podem ser usadas para o comércio e as propagandas do produto, ou para justificar a produção diante das diretrizes políticas e públicas. Com o objetivo de mudar os padrões de produção, são adotados alguns modelos que estimulam a mudança, como a Produção Mais Limpa, o Ecodesign, a Ecoeficiência, além dos sistemas de gestão ambiental e das suas respectivas certificações, como é o caso da série ISO 14000 (conjunto de normas internacionais voltadas à gestão ambiental). Esses modelos se aplicam a determinadas fases do ciclo de vida do produto, visando obter resultados que reduzam ou eliminem as consequências negativas dos produtos sobre o meio ambiente, compatibilizando os impactos com os conceitos e as práticas do desenvolvimento sustentável (Monteiro, 2024). As aplicações relacionadas à sustentabilidade consistem em utilizar os resultados da ACV para orientar decisões que promovam a redução dos impactos ambientais e o uso mais eficiente dos recursos (NBR ISO 14044 Gestão ambiental, 2009). Essas aplicações incluem:

- Identificação de *hotspots* ambientais (pontos críticos): detectar os pontos críticos ao longo do ciclo de vida no qual os impactos são mais significativos e, assim, priorizar ações de mitigação;
- Otimização de processos: ajudar na reformulação de processos produtivos, para reduzir o consumo de energia, água e matérias-primas, bem como minimizar a geração de resíduos;
- Suporte à tomada de decisão: fornecer informações quantitativas que fundamentem políticas e estratégias de sustentabilidade, alinhando práticas industriais e de consumo a metas de redução de emissões;
- Avaliação de melhorias e inovações: permitir a mensuração dos benefícios ambientais de tecnologias e práticas sustentáveis, como o uso de insumos inovadores ou fontes de energia renováveis.

A ISO 14044:2009 apresenta o relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV, conforme a Figura 4:

**Figura 4** – Elementos da fase de interpretação e o relacionamento com as outras fases da ACV.



**Fonte:** ABNT-NBR ISO 14044:2009.

A fase de interpretação passa por duas subfases para expressar as conclusões, limitações e recomendações:

- Identificar questões significativas com base nos resultados das fases ICV e AICV da ACV;
- Avaliar o estudo e as contribuições relevantes para a clareza e confiabilidade dos resultados das fases ICV e AICV da ACV.

### 3.9.3 Definição de objetivo e escopo

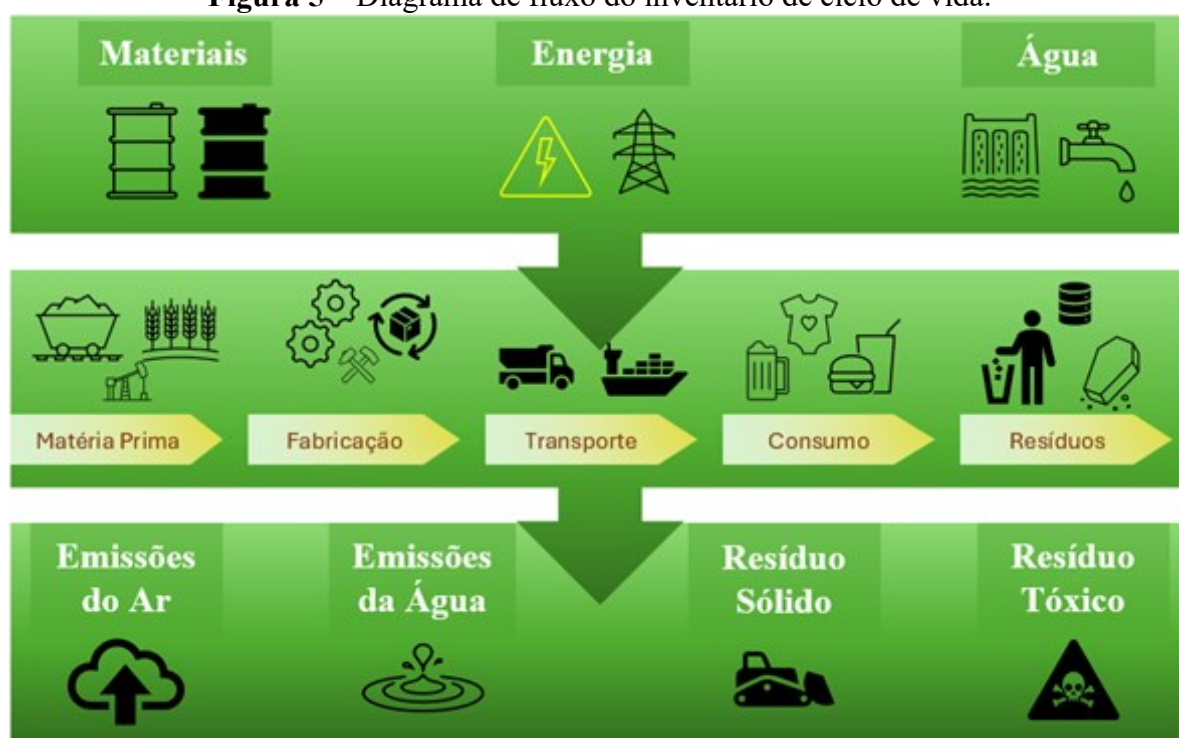
Conforme as normas já discutidas, nesta fase inicial, são estabelecidos o propósito do estudo e os parâmetros que o delimitarão. Isso inclui a definição clara do sistema de produto ou serviço a ser analisado, suas funções, a unidade funcional que servirá como referência, as fronteiras do sistema, os procedimentos de alocação e as categorias de impacto ambiental que serão consideradas. A precisão e organização na definição desses elementos é de suma importância, para garantir que o estudo seja conduzido de maneira eficiente e que os resultados atendam aos objetivos propostos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

A unidade funcional é a unidade de referência quantitativa à qual todos os fluxos de entradas e saídas na ACV estão relacionados. Por exemplo: 1 kg de calcário tratado e moído pronto para a distribuição (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006).

### 3.9.4 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise de Inventário do Ciclo de Vida é a segunda fase da ACV, sendo responsável pela coleta e quantificação dos dados relacionados às entradas (como materiais, energia e água) e saídas (como emissões e resíduos) do sistema em estudo. Essa fase possibilita uma visão detalhada de todos os fluxos de materiais e energia associados ao ciclo de vida do produto, abrangendo desde a extração de matérias-primas até a disposição final dos resíduos, conforme ilustrado na Figura 5.

**Figura 5** – Diagrama de fluxo do inventário de ciclo de vida.



**Fonte:** Autor – adaptado de Souza (2022).

Os inventários de bancos de dados são parametrizados por 1 kg; portanto, resultados em 1 t correspondem a reescalonamento linear ( $\times 1.000$ ) sem alterar a estrutura interna do modelo. No presente estudo, a análise de  $\text{CO}_2$  biogênico por  $\Delta\text{SOC}$  foi expressa em  $\text{tCO}_2\text{e ha}^{-1}$  com base na produtividade de cada cenário.

### 3.9.5 Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV)

A avaliação de impacto do ciclo de vida constitui a terceira fase da ACV, e seu principal objetivo é fornecer informações adicionais que possibilitem a interpretação dos resultados obtidos no ICV, permitindo uma melhor compreensão da significância ambiental do sistema de produto estudado (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Nessa fase, os dados do inventário são correlacionados às categorias de impacto ambiental, como mudança do clima, acidificação e eutrofização, entendidas como potenciais impactos ambientais em diferentes compartimentos do meio, conforme o método de caracterização adotado. A avaliação de impacto ocorre em três etapas principais:

- Classificação: os dados do inventário são organizados e atribuídos a categorias de impacto específicas, de acordo com seus potenciais efeitos ambientais;
- Caracterização: os dados do inventário são convertidos em unidades comuns por meio de fatores de equivalência, definidos de acordo com cada categoria de impacto e com o método de caracterização adotado. Na categoria mudança do clima, por exemplo, 1 kg de N<sub>2</sub>O e 1 kg de CH<sub>4</sub> podem ser expressos em CO<sub>2</sub> equivalente, permitindo comparar a contribuição desses gases para o aquecimento global. Em outras categorias, contudo, são utilizadas substâncias de referência diferentes (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009);
- Seleção de indicadores e modelos de caracterização: são definidos os indicadores a serem utilizados para representar cada categoria de impacto e os modelos a serem aplicados para a quantificação dos impactos ambientais (Santos, 2020).

Entende-se como impacto ambiental a modificação do meio ambiente, tanto adversa como benéfica, que resulte, total ou parcialmente, dos aspectos ambientais de uma organização, conforme definido pela norma ABNT NBR ISO 14001:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). No contexto da avaliação do ciclo de vida, tais efeitos são representados pelos fluxos de entrada e saída do sistema, posteriormente relacionados a categorias de impacto por meio de modelos de caracterização. Nesse âmbito, o ecossistema em que uma organização opera abrange não apenas os elementos naturais — ar, água, solo, recursos naturais, flora e fauna —, mas também os seres humanos e suas inter-relações (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) ou, em conceito mais amplo “é tudo o que envolve ou cerca os seres vivos” (Barbieri, 2007).

### 3.9.6 Interpretação na ACV

De acordo com a ABNT NBR ISO 14044:2009, a interpretação visa correlacionar todas as três fases anteriores, e os resultados das etapas ICV e AICV são analisados e consolidados para embasar conclusões, recomendações e a tomada de decisões (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Nesta etapa, é importante verificar a consistência entre os resultados, os objetivos e o escopo do estudo, garantindo que as combinações de dados e impactos ambientais avaliados sejam coerentes. Para isso, são conduzidas análises de sensibilidade e completude, a fim de identificar quais variáveis exercem maior influência sobre os resultados e assegurar a confiabilidade da avaliação (Santos, 2020).

Além disso, a interpretação do ciclo de vida possibilita a identificação dos impactos ambientais mais significativos e fornece recomendações para a implementação de melhorias no sistema analisado. Em alguns casos, uma análise simplificada, baseada apenas no ICV e na interpretação, pode ser suficiente para atingir os objetivos do estudo, sendo este tipo de abordagem conhecido como estudo de ICV (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

### 3.9.7 Categorias de impacto

As categorias de impacto são usadas para quantificar os efeitos ambientais de diferentes fluxos de entrada e saída em um sistema avaliado, estando diretamente relacionadas com a AICV — a terceira fase da ACV —, na qual é feita a escolha do modelo de caracterização que melhor se adapta a cada categoria.

Os modelos são escolhidos com base em critérios como relação causa-efeito, abrangência geográfica, escala temporal, fluxos elementares e clareza das variáveis, entre outros. No documento de recomendações sobre modelos de caracterização para ACV no Brasil, a RAICV — Rede de pesquisa de avaliação do impacto do ciclo de vida (2019) — classificou esses critérios em três categorias principais: abrangência do escopo de aplicação; robustez científica; e fatores de caracterização nacionais/regionalizados.

O método ReCiPe 2016 Midpoint (H), por exemplo, é um dos mais utilizados pela comunidade acadêmica, dispondo de 18 categorias de impacto e 3 causadores de danos (National institute for public health and the environment, 2016). A escolha do método depende do momento em que o avaliador quer quantificar as cargas de impacto, pois diferentes métodos podem oferecer níveis variados de detalhamento e foco em determinados estágios do ciclo de

vida. Por exemplo: alguns métodos são mais adequados para análises de *midpoint*, que capturam impactos intermediários, enquanto outros permitem a quantificação dos efeitos finais (*endpoint*) nos ecossistemas e na saúde humana (Souza, 2022).

A ABNT NBR ISO 14044:2009 estabelece, no item 4.4.2, que a fase de AICV deve incluir os seguintes elementos obrigatórios:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

### 3.9.8 Escolha entre *midpoint* e *endpoint*

A Figura 6 apresenta, de forma esquemática, a relação entre os fluxos do inventário do ciclo de vida, as categorias de impacto do tipo *midpoint* e as áreas afetadas do tipo *endpoint*. No esquema, o ciclo do sistema de produto é representado desde a matéria-prima até a geração de resíduos, enquanto as emissões e extrações associadas são relacionadas às categorias de impacto selecionadas no estudo. Essas categorias representam pontos intermediários da cadeia causal de impacto ambiental e, posteriormente, são associadas às áreas de proteção finais, como saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais.

**Figura 6** – Categorias de impacto, áreas afetadas e exemplo de relação.



**Fonte:** Autor – adaptado de Feijoo e Moreira (2020).

A figura 6 tem caráter ilustrativo e visa apenas facilitar a compreensão da inter-relação entre as fases de ICV, AICV, categorias *midpoint* e áreas *endpoint*. Assim, as substâncias e conexões apresentadas não devem ser interpretadas como associações exclusivas ou exaustivas, uma vez que a caracterização dos impactos depende do método adotado e das categorias ambientais selecionadas.

### 3.9.10 Softwares e banco de dados

Diversos *softwares* são utilizados para modelagem e cálculo de ACV, diferindo quanto à interface, disponibilidade, aos custos de licença e à compatibilidade com bancos de dados consolidados (com o Ecoinvent). A Tabela 4 apresenta uma síntese comparativa de plataformas e bases amplamente empregadas em estudos acadêmicos e industriais, destacando descrição, características gerais e disponibilidade, conforme Morán (2024).

**Tabela 4** – *Softwares* de ACV e bancos de dados: descrição, características e disponibilidade.

| <i>Software/base</i> | <i>Descrição</i>                                                                             | <i>Característica</i>                                                                                               | <i>Disponibilidade</i>                                   |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>SimaPro</b>       | <i>Software</i> amplamente utilizado, em nível mundial, para realizar ACV                    | Interface fácil de usar, múltiplas bases de dados (Ecoinvent), ferramentas para análise de impacto                  | Comercial (versão de teste disponível)                   |
| <b>GaBi Software</b> | Plataforma para modelar o ciclo de vida de produtos, utilizada na indústria                  | Ampla base de dados, alta precisão, usado em estudos industriais e comerciais                                       | Comercial                                                |
| <b>openLCA</b>       | <i>Software</i> para modelagem do ICV e cálculo de impactos em ACV                           | Bases de dados, como Ecoinvent, Agribalyse, análise de impacto e simulações. openLCA Nexus (licenciamento de bases) | Gratuito ( <i>software</i> ); bases podem exigir licença |
| <b>Umberto LCA+</b>  | <i>Software</i> para modelagem de processos e ACV, com foco em fluxos de materiais e energia | Interface visual, modelagem detalhada, análise de impactos e custos                                                 | Comercial                                                |
| <b>LCA Commons</b>   | Ferramenta <i>on-line</i> Portal/repositório de dados e recursos para ACV                    | Dados detalhados sobre a produção, o uso e a disposição de produtos                                                 | Pago (acesso via portal)                                 |

|                       |                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ecoinvent</b>      | Base de dados de inventário do ciclo de vida (ICV) utilizada em vários programas de ACV | Banco de dados de ICV, especialmente para processos industriais                                        | Licenciado                                                                        |
| <b>Agri-footprint</b> | Banco de dados de ICV voltado para cadeias agroalimentares e processos agrícolas        | Inventários para agricultura, pecuária e insumos agroindustriais; frequentemente usado em ACV agrícola | Licenciado                                                                        |
| <b>Agribalyse</b>     | Base de dados de ICV para produtos agrícolas e alimentares                              | Forte uso em ACV agroalimentar; útil para comparações em sistemas de produção e alimentos              | Geralmente disponibilizada via plataformas/integrações (varia por versão/licença) |

**Fonte:** Adaptado de Morán (2024).

O openLCA tem sido amplamente utilizado para modelagem de ACV, pois permite integrar diferentes bases de dados e aplicar metodologias consolidadas de avaliação de impacto, conforme observado por Appel (2020).

A Figura 7 mostra o método (ReCiPe) de impacto, que pode ser selecionado antes do processamento de dados. Os *endpoints* — saúde humana, meio ambiente e recursos naturais — correspondem aos danos à saúde do ser humano, aos danos à qualidade do meio ambiente e aos danos à disponibilidade de recursos, respectivamente (National institute for public health and the environment, 2016).

**Figura 7** – Campo com opções do ReCiPe e as opções a serem selecionadas no openLCA.

**Fonte:** Autor – adaptado a partir da interface do openLCA.

### 3.9.11 Abordagens berço ao campo em ACV agrícola

Em estudos de ACV de cadeias agroalimentares, as fronteiras de sistema mais comuns são berço ao portão (*cradle-to-gate*), berço ao campo/portão da fazenda (*cradle-to-field/farm*) e berço ao túmulo (*cradle-to-grave*). Em termos práticos, para sistemas agrícolas, a abordagem berço ao campo corresponde ao acompanhamento dos fluxos de matéria e energia desde a extração e o processamento de matérias-primas, incluindo a produção do NCC como corretivo, até a aplicação no solo e a colheita do produto agrícola, incluindo operações de preparo de área, manejo de culturas, irrigação, emissões de  $N_2O$ ,  $CO_2$  e  $NH_3$  do solo e o uso de combustíveis em máquinas. Egas *et al.*, (2023), em uma revisão sobre ACV de fertilizantes de base biogênica, destacam que a consistência na definição dessas fronteiras é condição necessária para comparações robustas entre alternativas tecnológicas.

Aplicações recentes de ACV em cultivos hortícolas ilustram a importância da escolha das fronteiras. Mousavi *et al.*, (2022) avaliaram a produção de alface em sistemas convencionais de campo a partir de uma abordagem berço ao campo, mostrando que o consumo de diesel e o uso de fertilizantes nitrogenados são os principais contribuintes para categorias como aquecimento global, acidificação e eutrofização, e que a eficiência energética do sistema é baixa, quando se consideram todos os insumos agrícolas e as operações mecanizadas. De forma complementar, Banboukian *et al.*, (2025) compararam, via ACV, três sistemas de produção de alface (campo aberto, estufa de baixa energia e hidroponia em ambiente controlado) e evidenciaram que, embora os sistemas altamente controlados possam ser mais eficientes em uso de água e terra, eles apresentam impactos ambientais substantivamente maiores quando a energia elétrica utilizada é dominada por fontes fósseis, reforçando a relevância da matriz energética nas avaliações do tipo berço ao portão (*cradle-to-gate*) e berço ao campo (*cradle-to-field*).

Martin *et al.*, (2024) realizaram um estudo de ACV de uma fazenda vertical containerizada que produz alface para consumo local, adotando fronteiras berço ao portão e comparando esse sistema com o fornecimento convencional. Os autores demonstram que a inclusão de processos de embalagem, refrigeração e transporte pode reduzir (ou até inverter parcialmente) a vantagem climática de sistemas de produção próximos ao consumidor, dependendo da intensidade de carbono do *mix* elétrico e da logística de distribuição. Assim, o estudo evidencia que a escolha das fronteiras e a inclusão consistente de etapas relevantes são determinantes para as interpretações — o que justifica, nesta tese, a adoção explícita das

fronteiras *cradle-to-gate* (produção de NCC) e *cradle-to-field* (sistemas agrícolas), bem como a atenção aos *hotspots* associados à energia e ao transporte.

### **3.10 Processo de armazenamento, captura e uso de carbono**

Processos e tecnologias de captura e utilização de CO<sub>2</sub> merecem atenção, considerado que o principal contribuinte para o aquecimento global - o dióxido de carbono - é um tema de extrema relevância, tanto na pesquisa acadêmica quanto na indústria (Mikayilov *et al.*, 2022).

Vaz Jr. *et al.*, (2022) destacam que, com o crescimento industrial e o uso intensivo de combustíveis fósseis, a emissão deste gás tende a aumentar, o que impõe a necessidade de adoção de políticas ambientais e tecnológicas em todos os países, independentemente do seu nível econômico.

#### **3.10.1 Definições e panorama recente (CCU, CCS e CCUS)**

A captura, utilização e o armazenamento de carbono (CCUS, do inglês *Carbon capture, utilization and storage*) reúnem um conjunto de tecnologias voltadas para separar CO<sub>2</sub> de correntes industriais (especialmente, pós-combustão), comprimi-lo e direcioná-lo para uso em processos industriais (CCU, do inglês *Carbon capture and utilization*) e/ou o armazenamento geológico (CCS, do inglês *Carbon capture and storage*), conforme International energy agency (2024). Revisões recentes indicam que o tema é dinâmico, com rápida evolução em tecnologias emergentes e expansão do portfólio global de projetos, o que justifica a atualização constante da literatura, conforme citado no Global CCS institute (2025).

#### **3.10.2 Tecnologias de captura de CO<sub>2</sub>**

A captura do CO<sub>2</sub> pode ocorrer em diferentes etapas do processo de combustão, conforme descrito pelo Intergovernmental panel on climate change (2005): i) pré-combustão; ii) combustão; e iii) pós-combustão. Revisões recentes destacam que, embora a absorção química (por exemplo: aminas) permaneça a rota mais madura e difundida, há rápido avanço em alternativas como adsorção em sólidos, separação por membranas e ciclos de *looping* (como *calcium looping*), que podem reduzir penalidades energéticas e ampliar a aplicabilidade do CCUS em diferentes fontes emissoras, de acordo com Hanson *et al.*, (2025).

### 3.10.3 Rotas de utilização do CO<sub>2</sub> e produtos derivados

Uma vez capturado, o CO<sub>2</sub> pode ser utilizado como matéria-prima em diferentes aplicações. Ghanbaralizadeh *et al.*, (2016) organizaram o uso do CO<sub>2</sub> em rotas como:

- Produção química (por exemplo: obtenção de polímeros e carbonatos);
- Produção de combustíveis (como insumo para a síntese de gasolina e diesel);
- Aproveitamento biológico (como fonte de carbono para o crescimento de microalgas ou cultivo de plantas);
- Utilização convencional (como solvente em processos industriais).

Entre as alternativas de mitigação, a utilização do CO<sub>2</sub> como insumo industrial é particularmente atrativa, pois transforma um subproduto indesejado em matéria-prima para a produção de materiais novos. Características como abundância, baixo custo e baixa toxicidade relativa em condições controladas de uso reforçam seu potencial (Antony *et al.*, 2018).

Entre as rotas de CCU, destaca-se a carbonatação/mineralização, na qual o CO<sub>2</sub> é incorporado em carbonatos relativamente estáveis (International energy agency, 2024). Essa família de processos pode conectar mitigação de emissões industriais e produção de materiais, mas sua atratividade ambiental deve ser avaliada com fronteiras claras e inventários consistentes, uma vez que consumos de energia e reagentes podem dominar os impactos (Hanson *et al.*, 2025). Estruturas recentes para “produtos do CO<sub>2</sub>”, como a abordagem da “CO<sub>2</sub> Tree”, organizam famílias de produtos e rotas, e reforçam que o desempenho climático depende de fatores tecnológicos e do contexto energético e de mercado (Leclerc *et al.*, 2024).

O estudo de Vaz Jr. *et al.*, (2022) concentra-se na análise destas tecnologias aplicadas aos setores energéticos, principalmente em plantas termelétricas e usinas de etanol, discutindo as vantagens e os desafios de cada método.

Em particular, ressalta-se que, embora a absorção seja uma das técnicas mais maduras e aplicadas em larga escala no momento, outras tecnologias — como a separação por membranas e a captura química — apresentam potencial para inovações que podem agregar valor no produto, econômico e ambiental, especialmente quando associadas a mecanismos de mercado de carbono e estratégias de avaliação de maturidade tecnológica que são dotadas do TRL1 (correspondendo ao conceito inicial) até o TRL 9 (denominado nível comercial) (Souza, 2022).

### 3.10.4 Carbono biogênico na ACV agrícola

Em estudos de ACV, o tratamento do carbono biogênico (isto é, o carbono de origem recente, fixado pela fotossíntese na biomassa e no solo) tem sido objeto de intenso debate metodológico. A carta editorial recente de Nemecek *et al.*, (2025) sintetiza princípios que hoje são considerados boas práticas para contabilização de carbono biogênico: (i) apenas mudanças líquidas e persistentes na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera devem ser consideradas; (ii) armazenamentos temporários de carbono só devem ser contabilizados quando a permanência for superior a, aproximadamente, 10 anos; (iii) sempre que fluxos biogênicos forem incluídos, o balanço de carbono precisa ser completo (*uptake* e emissões subsequentes); e (iv) os fluxos de carbono biogênico e fóssil devem ser reportados separadamente, a fim de evitar conclusões enviesadas.

Leifeld e Keel (2022) mostram que aumentos de carbono no solo podem reduzir temporariamente a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e, portanto, produzir um benefício climático de curto prazo. No entanto, se esse carbono for rapidamente reemitido (reversão), o efeito de mitigação se perde. Por isso, ganhos de carbono no solo com baixa permanência por exemplo, com duração inferior ao intervalo de 10 a 20 anos, não devem ser tratados como remoções equivalentes às de reservatórios geológicos. Em trabalho subsequente, Leifeld (2023) discute o conceito de *carbon farming* e alerta para o risco de superestimar o potencial de mitigação, quando se consideram sumidouros não permanentes como equivalentes a remoções de longo prazo, sobretudo em políticas de créditos de carbono.

No contexto de fertilizantes e insumos agrícolas, Egas *et al.*, (2023) revisaram a aplicação da ACV a fertilizantes de base biogênica e mostram que escolhas metodológicas sobre fronteiras de sistema, alocação e tratamento do carbono biogênico explicam grande parte da variabilidade dos resultados de emissões de GEE relatados na literatura. Os autores ressaltam a necessidade de transparência na representação de fluxos de carbono associados a resíduos orgânicos, biofertilizantes e mudanças em Estoque de Carbono Orgânico do Solo ( $\Delta$ SOC), recomendando que tais fluxos sejam explicitamente reportados e, quando possível, apoiados em dados experimentais.

Esta discussão é particularmente relevante para o presente estudo, que combina a síntese de NCC a partir de CO<sub>2</sub> (transformando carbono em forma mineral estável) com cenários agrícolas que avaliam  $\Delta$ SOC em sistemas de soja e alface. Enquanto o carbono estabilizado no NCC pode ser tratado, do ponto de vista climático, como armazenamento de longa duração (mineral), alterações no carbono do solo e na biomassa aérea e radicular tendem a ser de

natureza biogênica e, em muitos casos, não permanente. A abordagem adotada nesta pesquisa procura, portanto, diferenciar claramente o carbono de origem fóssil, o carbono biogênico de ciclo curto e o carbono mineralizado no NCC, em linha com as recomendações metodológicas recentes descrita por Nemecek *et al.*, (2025).

O crescimento populacional e o consequente aumento das emissões de gases de efeito estufa impõem desafios à produção de alimentos, exigindo soluções eficientes e sustentáveis (Aboueata *et al.*, 2021).

A produção de alimentos pode ser aumentada pelo uso de novas áreas e pelo aumento da produtividade das áreas usadas. No contexto atual da sustentabilidade, a abertura de novas áreas para a produção de alimentos deve ser considerada com cautela. Embora a expansão territorial possa aumentar a produção, ela frequentemente implica riscos de desmatamento, degradação dos ecossistemas e perda de biodiversidade. Assim, alternativas como a intensificação sustentável das áreas já em uso, mediante a adoção de tecnologias modernas e práticas agroecológicas, podem oferecer soluções mais responsáveis e eficientes para aumentar a produtividade sem comprometer os recursos naturais (FAO, 2020).

A atividade agrícola é uma das maiores responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub>. Esse gás pode ser gerado, entre outras fontes, pela aplicação de calcário, que é utilizado para reduzir a acidez do solo e para melhorar o desenvolvimento das plantas cultivadas. Esse efeito ocorre a partir da reação entre a água e o CaCO<sub>3</sub> ou o MgCO<sub>3</sub> (componentes do calcário), resultando na liberação de CO<sub>2</sub> (Emrich, 2013).

A nanotecnologia oferece potencial para a criação de nanofertilizantes e nanopesticidas com eficiência de liberação e entrega direcionada aprimorada. Essas tecnologias podem aumentar a produtividade das culturas, minimizando o uso excessivo de produtos químicos agrícolas e seus impactos ambientais negativos (Qudrat, 2024).

Cerca de 70 % dos solos tropicais brasileiros são considerados ácidos, decorrente, principalmente, do intenso intemperismo e da lixiviação contínua dos nutrientes; esse processo natural resulta em baixos valores de valor de pH e alta concentração de íons H<sup>+</sup> e Al<sup>+3</sup>. Além disso, a exploração intensiva dos nutrientes pelas raízes das plantas, a erosão do solo e o uso de fertilizantes acidificantes agravam essa condição (Moreira, 2024).

De acordo com a ABRACAL (Associação Brasileira de Produtores de Cal, 2026), a estimativa é de que o agronegócio do Brasil necessite de 80 milhões de toneladas de calcário/ano para a correção da acidez dos solos. Contudo, mesmo com avanço recente, o consumo segue abaixo desse patamar: em 2023, foi reportado consumo de 61,6 milhões de toneladas (recorde recente); e, em 2024, o consumo alcançou cerca de

60 milhões de toneladas. Ao todo, o setor contabiliza um déficit de 23 % a 25 % o que corresponde a um intervalo de 18 milhões de toneladas a 20 milhões de toneladas de calcário na calagem do solo brasileiro.

### 3.10.5 Características do calcário de rocha visando comparação com as do NCC

Atualmente, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conhecido popularmente como calcário, é proveniente das minas de calcário. A mineração da rocha calcária é de grande importância na agricultura brasileira, embora o processo de mineração contribua para as emissões atmosféricas, sobretudo, de dióxido de carbono e material particulado, especialmente nas etapas de extração, britagem e moagem, pois envolve a utilização intensiva de combustíveis fósseis (Huseyin, 2020). O cálcio é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, estimado em 3 % a 4 %, sendo constituinte dos calcários e de outras rochas carbonáticas. O  $\text{CaCO}_3$  pode formar-se por processos químicos, bioquímicos e biológicos, em diferentes contextos geológicos, incluindo ambientes sedimentares, hidrotermais, magmáticos e metamórficos, sendo o principal constituinte de muitos calcários, mármore e carbonatitos. Ocorre também em tufos, meteoritos, conchas e como cimento em rochas sedimentares, comum em cavernas como espeleotemas, e em rochas ígneas alcalinas e máficas. O calcário é uma rocha que contém uma quantidade significativa de  $\text{CaCO}_3$  (Navarro *et al.*, 2017).

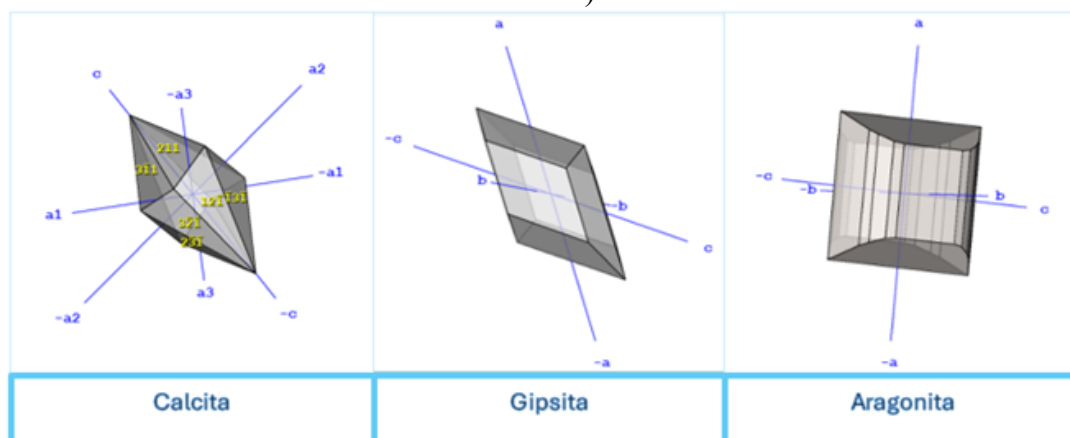
O  $\text{CaCO}_3$  pode ser encontrado na natureza em formas cristalinas, como calcita e aragonita (Figura 8). Embora apresentem a mesma fórmula química, essas fases diferem quanto à estrutura cristalina e à estabilidade: a calcita é a forma mais estável e possui estrutura trigonal; a aragonita é estável em condições de maior pressão e temperatura e cristaliza no sistema ortorrômbico (Morse, 1990). Essa distinção estrutural é amplamente descrita na literatura mineralógica (Sampaio, 2008). Descrições clássicas de mineralogia também detalham as diferenças entre os polimorfos de  $\text{CaCO}_3$  (Deer, 2013).

Além dessas, existem o carbonato de cálcio amorfo, comum em processos biogênicos, e a dolomita, mineral associado formado por carbonato duplo de cálcio e magnésio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), amplamente utilizado na agricultura como corretivo de solos ácidos (Chang, 2017).

Outro mineral amplamente utilizado na agricultura é o gesso agrícola, que contém cálcio e enxofre em sua composição química, ocorrendo na forma cristalina de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (Figura 8). Diferentemente da calcita e da aragonita, que compartilham a mesma composição

química, mas possuem estruturas distintas (polimorfismo), a gipsita apresenta uma fórmula química diferente, ainda que visualmente possa ser semelhante à calcita (Guggenheim, 2001).

**Figura 8** – Estruturas cristalinas de polimorfos e minerais relacionados ao  $\text{CaCO}_3$  (Adaptado do acervo de minerais economicamente relevantes, do Museu de Minerais, Minérios e Rochas).



**Fonte:** Prof. Dr. Heinz Ebert (2017).

Além das formas cristalinas mais frequentemente encontradas na natureza, como calcita e aragonita, o carbonato de cálcio também pode ocorrer como vaterita, uma fase metaestável e menos comum, (MHE Museu Heinz Ebert, 2025). Embora menos estável, a vaterita é relevante no contexto da síntese de nanocarbonato de cálcio, pois pode ser formada durante o processo de precipitação, apresentando morfologia característica em forma de agulhas (Costa *et al.*, 2017). Nesse sentido, o monitoramento da formação de polimorfos durante a síntese torna-se importante, especialmente em etapas futuras de escalonamento do processo (Guggenheim, 2001).

### 3.10.6 Calcário no Brasil

O Brasil possui, atualmente, mais de 50 tipos de recursos minerais com reservas conhecidas, e um deles é o calcário com a finalidade de uso agrícola, sendo o Mato Grosso o maior produtor do país, segundo fontes da Agência nacional de mineração (ANM), tendo produzido em 2021 cerca de 10,9 milhões de toneladas (Agência nacional de mineração, 2021).

O Brasil emitiu cerca de 1,3 GtCO<sub>2</sub>e em 2023 e, ao mesmo tempo, apresenta elevada demanda por calcário, tanto para uso agrícola quanto para aplicações industriais. No setor agrícola, estima-se a necessidade de aproximadamente 80 milhões de toneladas de calcário por

ano para a correção da acidez dos solos. Além de sua importância na agricultura, o calcário também é amplamente utilizado na fabricação de cimento, atividade associada a emissões significativas de CO<sub>2</sub>. Contudo, as informações específicas sobre as emissões provenientes do uso do calcário ainda são bastante restritas. O consumo de calcário para cada estado do país pode ser obtido por meio dos anuários publicados pela agência nacional para difusão de adubos (ANDA), que quantificam as entregas de calcário no país a cada ano (Emrich, 2013). O nanocarbonato de cálcio surge como um material promissor, devido às suas propriedades físico-químicas associadas à escala nanométrica, como elevada área superficial específica, maior reatividade, melhor dispersão e maior eficiência de contato com as partículas do solo. Essas características podem acelerar a neutralização da acidez e reduzir a quantidade necessária por unidade de efeito agrônômico. Além disso, o NCC permite aplicações inovadoras na indústria e pode contribuir para a redução da pegada de CO<sub>2</sub> (Souza, 2022; Vaz Jr., 2021).

### **3.10.7      Uso da calagem agrícola**

O carbonato de cálcio desempenha papel importante na agricultura, especialmente na correção da acidez do solo e no fornecimento de cálcio para as plantas. A aplicação deste composto inorgânico, conhecida como calagem, é fundamental para melhorar a fertilidade do solo e, conseqüentemente, a produtividade agrícola (Bossolani, 2020).

O calcário é um corretivo de solo e altera o valor do seu pH; o gesso (CaSO<sub>4</sub>) agrícola é um condicionador de solo e não altera o valor do pH desse solo. Dessa forma, calcário e gesso agrícola são considerados insumos complementares e não concorrentes (Aguiar, 2021).

A Associação brasileira dos produtores de calcário agrícola (2016) destaca os seguintes benefícios do uso do calcário na agricultura:

- Altera o valor de pH do solo, corrigindo sua acidez;
- Possui baixa solubilidade, promovendo ação gradual e prolongada;
- Fornece cálcio (Ca) e magnésio (Mg), importantes nutrientes de plantas;
- Reduz o teor de alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>), que é tóxico para as raízes em solos ácidos e compromete a absorção de nutrientes;
- Atua, principalmente, na camada superficial do solo (0 cm - 20 cm);
- Ao elevar o valor de pH, favorece a disponibilidade de nutrientes como fósforo (P), enxofre (S), nitrogênio (N) e potássio (K), melhorando a eficiência de adubação;

- Estimula o desenvolvimento do sistema radicular, melhora a absorção de água e reduz a erosão do solo, promovendo maior sustentabilidade na produção agrícola.

### 3.10.8 Tipos de calcário visando concorrência com NCC

Todos os tipos de calcário utilizados na agricultura possuem quantidade suficiente de carbonato de cálcio para promover a correção da acidez do solo. No entanto, a diferença entre eles reside na concentração de magnésio e na granulometria (Moreira, 2024).

Um solo ideal deve apresentar um nível de Ca cerca de três vezes maior do que o nível de Mg (Associação brasileira dos produtores de calcário agrícola, 2016). No mercado, existem os seguintes produtos comerciais:

- Calcário calcítico, com menos de 5 % m por m de MgO;
- Calcário magnesiano, com 5 % a 12 % m por m de MgO;
- Calcário dolomítico, com mais de 12 % m por m de MgO.

O calcário *filler* é uma forma de calcário agrícola com granulometria extremamente fina, o que proporciona reação mais rápida no solo — especialmente, em sistemas de plantio direto. Ele pode ser produzido a partir de qualquer um dos três tipos principais de calcário (calcítico, magnesiano ou dolomítico), diferenciando-se pelo tamanho das partículas, e não pela composição química. Assim como o NCC, a granulometria reduzida está relacionada a maior superfície de contato e à maior eficiência de reação, o que justifica sua comparação com materiais nanoestruturados (Moreira, 2024).

### 3.10.9 Potenciais vantagens do NCC

O NCC pode impactar de modo positivo a agricultura a partir das seguintes ações:

- Captura de CO<sub>2</sub> e redução de emissões industriais: a captura do CO<sub>2</sub> gerado na queima de carvão mineral em termoelétricas possibilita a utilização do CO<sub>2</sub> na produção de NCC. As emissões desse setor foram de 3600 milhões de kg CO<sub>2</sub>e, em 2020, e 3638 milhões de kg CO<sub>2</sub>, em 2022 (Sistema de estimativas de emissões de gases do efeito estufa – Ministério do Meio Ambiente, 2020; 2022).

O estudo buscará mensurar quanto CO<sub>2</sub> pode ser capturado por unidade de usina/ano e avaliar seu potencial para gerar créditos de carbono;

- Melhoria da eficiência agrônômica e redução do uso de insumos: a aplicação de NCC pode melhorar as propriedades físico-químicas do solo — especialmente, ao corrigir a acidez de forma mais eficiente, graças à sua maior superfície de contato e reatividade. Com isso, há melhoria nas condições de absorção de nutrientes já presentes no solo, o que pode reduzir a necessidade de aplicação adicional de fertilizantes. Embora o NCC não substitua fertilizantes nitrogenados, fosfatados ou potássicos, sua ação corretiva pode melhorar a eficiência do uso desses insumos, impactando indiretamente no consumo de energia e água associados à produção agrícola;
- Melhoria da qualidade do solo: a aplicação do NCC pode melhorar a estrutura e fertilidade do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e reduzindo a erosão. Embora a biodiversidade microbiana do solo seja mais fortemente influenciada pela dinâmica do carbono orgânico, um solo menos ácido e fisicamente estável também cria um ambiente mais favorável à atividade biológica. Portanto, o NCC pode, indiretamente, contribuir para a manutenção de um microbioma mais equilibrado e para um manejo mais sustentável do carbono no solo.

Poucos artigos e autores usaram produtos com nanotecnologia de carbonatos, que geralmente são indiretamente citados. Diversas vantagens do NCC são descritas nesses trabalhos e podem ser comparadas ao uso do calcário comercial tradicional, justificando esse projeto de pesquisa, não só na sua aplicação na agricultura, mas também em outros setores:

- Neutralização mais rápida da acidez do solo: devido à sua alta reatividade, o NCC corrige o valor de pH do solo de maneira mais rápida e eficiente, em comparação ao calcário comercial (Gao *et al.*, 2023). O calcário comercial tem liberação gradual, podendo levar meses para atingir o efeito desejado (Associação brasileira dos produtores de calcário agrícola, 2016). O NCC apresenta maior biodisponibilidade de cálcio, permitindo uma absorção mais rápida pelos vegetais (Poudyal *et al.*, 2021). O calcário dolomítico comercial contém magnésio, mas sua liberação ocorre de forma lenta, dependendo das condições do solo (Moreira, 2024);

- Sustentabilidade e captura de CO<sub>2</sub>: o NCC pode ser produzido a partir da captura de CO<sub>2</sub> de emissões da indústria metalúrgicas, contribuindo para a redução dos gases de efeito estufa (Lee *et al.*, 2020). O calcário comercial é obtido da extração de rochas calcárias, um processo que envolve alto consumo de energia e pode gerar impactos ambientais, como a degradação de ecossistemas (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Segundo Poudyal *et al.*, (2021), o desempenho do nano-CaCO<sub>3</sub> em matrizes cimentícias depende de sua dispersão adequada e minimizando a aglomeração, sendo avaliadas estratégias de mistura para promover distribuição mais uniforme das nanopartículas. Esse resultado, embora obtido no contexto de cimento, reforça que o uso de partículas nanoestruturadas em sistemas aquosos requer atenção à dispersibilidade e à estabilidade da suspensão. Assim, a eventual aplicação de NCC em práticas agrícolas que utilizem água como veículo (por exemplo: fertirrigação) deve ser avaliada quanto à estabilidade coloidal e às condições operacionais, considerando sua elevada área superficial e reatividade.

### **3.11 Economia circular**

A economia circular pode ser compreendida, no contexto desta tese, como uma abordagem em que fluxos residuais de um sistema produtivo são reinseridos em novas cadeias de valor, com redução de desperdícios, emissões e dependência de matérias-primas virgens. Nessa perspectiva, a conversão de CO<sub>2</sub> de origem industrial em nanocarbonato de cálcio com aplicação agrícola representa uma forma de valorização de carbono capturado, integrando setor energético, processo químico e produção de alimentos. Assim, o NCC pode ser interpretado, em caráter exploratório, como um insumo alinhado aos princípios da economia circular e à descarbonização articulada entre indústria e agricultura (Brasil, 2025).

### **3.12 Políticas públicas no Brasil e Plano Clima**

No contexto brasileiro, a discussão sobre o uso do NCC também pode ser relacionada aos instrumentos recentes de política climática e energética. O Plano Clima 2024–2035, principal referência federal de planejamento climático, para o enfrentamento da mudança do clima na próxima década, estrutura-se nos eixos de mitigação, adaptação e estratégias

transversais, incluindo a “Estratégia Nacional de Mitigação” e os “Planos Setoriais de Mitigação” para segmentos estratégicos da economia brasileira (Brasil, 2025).

Nesse quadro, rotas de captura e uso de carbono associadas à produção de insumos agrícolas podem ser interpretadas como alternativas potencialmente alinhadas às diretrizes nacionais de descarbonização, inovação tecnológica, economia circular e transição para uma economia de baixas emissões. A discussão aqui apresentada também dialoga com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à água, energia, crescimento econômico, consumo e produção responsáveis e ação climática, bem como com as metas adaptadas ao contexto brasileiro (ONU, 2015).

### **3.12.1 ODS e metas brasileiras**

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável estabelece um conjunto de objetivos globais voltados à erradicação da pobreza, à proteção ambiental, à ação climática e à promoção de sociedades mais sustentáveis. No Brasil, o IPEA coordenou a adequação das metas globais dos ODS à realidade nacional, subsidiando sua incorporação em políticas públicas e instrumentos de planejamento (IPEA, 2018).

- ODS 6 – Água potável e saneamento: relaciona-se ao uso da água na produção agrícola, à eficiência hídrica e à avaliação dos impactos associados ao consumo de água nos sistemas de cultivo avaliados;
- ODS 7 – Energia acessível e limpa: relaciona-se à descarbonização do setor energético, ao aproveitamento de emissões industriais e à integração com rotas de captura e uso de carbono;
- ODS 8 – Trabalho decente e crescimento econômico: relaciona-se à inovação tecnológica, ao desenvolvimento de novas cadeias de valor e ao potencial de inserção de soluções de baixo carbono na economia brasileira;
- ODS 12 – Consumo e produção responsáveis: Relação com a tese: valorização de CO<sub>2</sub> residual como insumo, uso mais eficiente de recursos e redução da dependência de matérias-primas convencionais;

- ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima: Relação com a tese: mitigação de emissões, ACV aplicada à descarbonização e alinhamento com instrumentos nacionais de política climática, como o Plano Clima 2024–2035.

### **3.12.2 Planos setoriais de mitigação do plano clima**

O “Plano Clima Mitigação” estabelece um marco estruturante da política climática brasileira, consolidando diretrizes, objetivos nacionais, metas e arranjos institucionais voltados à mitigação de gases de efeito estufa. A Estratégia Nacional de Mitigação é operacionalizada por meio de Planos Setoriais de Mitigação, que desdobram os objetivos nacionais em metas específicas de emissões ou remoções líquidas para 2030 e 2035, atribuindo responsabilidades aos diferentes setores da economia (Brasil, 2025).

Os Planos Setoriais de Mitigação contemplam os seguintes segmentos:

- Mudanças do uso da terra em áreas públicas e territórios coletivos;
- Mudanças do uso da terra em áreas rurais privadas;
- Agricultura e pecuária;
- Energia;
- Transportes;
- Cidades;
- Indústria;
- Resíduos e efluentes domésticos.

Dessa forma, a rota tecnológica avaliada nesta tese, baseada na captura e uso de CO<sub>2</sub> para obtenção de nanocarbonato de cálcio com aplicação agrícola, apresenta aderência conceitual a diferentes eixos do Plano Clima, especialmente aqueles relacionados à energia, à indústria, à agricultura e pecuária e à transição para sistemas produtivos de menor intensidade de carbono (Brasil, 2025).

### 3.13 Mercado de carbono

O termo mercado de carbono é comumente utilizado para designar dois tipos de comercialização de ativos relacionados às emissões de GEE, os quais se distinguem em aspectos fundamentais, como abrangência, perfil dos participantes e incidência de regulação (*International Chamber of Commerce Brasil*, 2021).

O primeiro instrumento corresponde a um sistema de comércio de emissões (SCE) inserido em um marco regulatório (ETS, do inglês *Emissions trading system*). Nesse arranjo, o governo estabelece um teto (*cap*) para as emissões de GEE e distribui ou leiloa permissões de emissão; agentes que emitem abaixo do limite podem negociar excedentes com agentes que excedem suas metas, caracterizando o modelo *cap-and-trade* ICAP (2024). No Brasil, essa lógica passou a integrar o arcabouço nacional com a instituição do Sistema brasileiro de comércio de emissões de gases de efeito estufa (SBCE), pela Lei nº 15.042/11 dez. 2024 (Brasil, 2024), estabelecendo as bases para um mercado regulado de carbono (Conselho empresarial brasileiro para o desenvolvimento sustentável – CEBDS, 2024).

O segundo tipo diz respeito a um mecanismo de compensação de emissões no qual os agentes não estão sujeitos a legislações obrigatórias. Nessa situação, empresas e indivíduos estabelecem metas de mitigação de forma autônoma, impulsionados por uma responsabilidade corporativa socioambiental. Esses agentes procuram, de maneira voluntária, neutralizar suas emissões de GEE por meio da aquisição de créditos de carbono no chamado mercado voluntário de carbono. Assim, a lógica que impulsiona a demanda por créditos nesse segmento é a intenção de remunerar agentes não regulados pela redução ou remoção de emissões (Prolo *et al.*, 2021).

#### 3.13.1 Créditos de carbono

Os créditos de carbono são certificados que representam uma quantidade específica de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou gases de efeito estufa (GEE) que foram reduzidas, evitadas ou absorvidas da atmosfera por meio de um projeto ou atividade ambiental. Cada crédito de carbono geralmente equivale a uma tonelada métrica de CO<sub>2</sub> ou ao seu equivalente em outros GEE (Morán, 2024).

Atualmente, o valor de um crédito de carbono varia significativamente entre diferentes mercados e regiões. A seguir, são apresentados os preços médios observados:

- Brasil (Real): no mercado voluntário brasileiro, os preços dos créditos de carbono podem variar entre R\$12,00 e R\$365,00 por tonelada, dependendo do tipo de projeto e da demanda. O valor atual em fevereiro de 2025 foi de R\$53,80 por tCO<sub>2</sub>e (CredCarbo, 2025);
- Europa (Euro): no Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), os preços dos créditos de carbono atingiram mais de €90,00 por tonelada (Figura 9) no fim de 2022 (Iberdrola, 2025);
- Mercado global (Dólar – USD, *United States Dollar*): no mercado voluntário, os preços variam amplamente, por tipo e qualidade do crédito. Em 2025, o preço médio anual estimado por um índice global foi de, aproximadamente, US\$3,5 por tCO<sub>2</sub>e, enquanto créditos de maior integridade tendem a apresentar valores superiores (por exemplo: ~US\$6,8 por tCO<sub>2</sub>e para créditos de maior integridade por qualidade ou acima).

**Figura 9 – Variação dos valores monetários de créditos de carbono, em Euros.**  
**Evolução do preço das permissões de emissão em diferentes mercados**



**Fonte:** Iberdrola – International Carbon Action (2025).

As empresas normalmente compram esses créditos para compensar uma parte de suas emissões de gases de efeito estufa, essencialmente pagando por projetos que reduzem a poluição climática.

O Brasil abriga parte da floresta Amazônica, cuja capacidade de absorver e estocar grandes quantidades de CO<sub>2</sub> confere relevância estratégica ao país nas discussões sobre mitigação climática e mercados de carbono (Pereira, 2024).

### 3.14 Aspectos econômicos associados à ACV

A integração de dimensões econômicas à ACV é frequentemente tratada por abordagens como *life cycle costing* (LCC) e avaliações de ecoeficiência, que buscam quantificar custos ao longo do ciclo de vida e apoiar decisões comparativas entre alternativas tecnológicas. Essa integração permite discutir *trade-offs* entre desempenho ambiental e potencial econômico, especialmente em tecnologias emergentes e rotas de descarbonização nas quais custos de energia, insumos e infraestrutura podem dominar a competitividade (Guinée *et al.*, 2011).

No contexto de sistemas agroindustriais e CCU/CCUS, estudos recentes enfatizam que a comparação econômica deve ser coerente com as fronteiras do sistema e com o horizonte temporal adotado, e que incertezas de escala, preços de energia e parâmetros de mercado (por exemplo: precificação de carbono) podem alterar conclusões (International energy agency, 2024).

Em particular, a precificação de carbono (em mercados regulados ou voluntários) tem sido discutida como mecanismo capaz de influenciar a atratividade econômica de rotas de mitigação, embora valores e critérios de integridade variem amplamente entre mercados e tipos de crédito (World Bank, 2025).

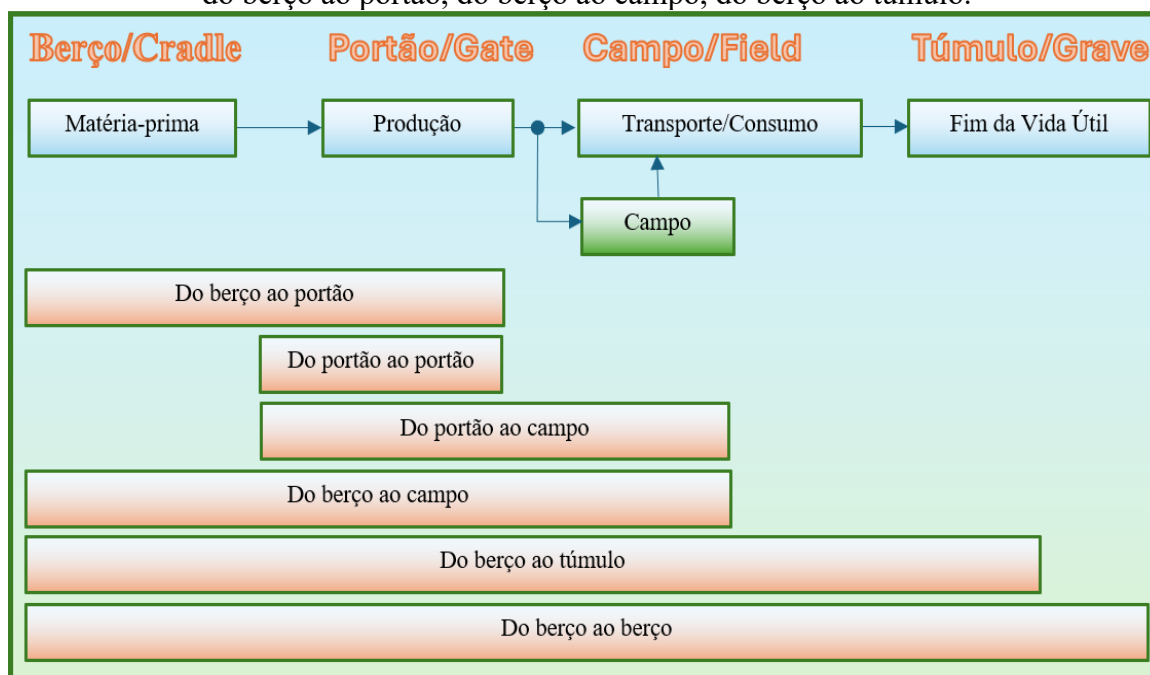
Neste contexto, mercados regulados (ou de *compliance*) são aqueles criados por marcos legais (como sistemas de comércio de emissões e/ou obrigações regulatórias) que impõem metas e regras de cumprimento aos agentes emissores. Mercados voluntários correspondem à compra e venda de créditos de carbono sem obrigação legal direta — geralmente, para atender metas corporativas voluntárias, compromissos climáticos ou estratégias de neutralização e compensação. Esse mercado é regulado por padrões e certificadoras privados internacionais, conforme Oliveira *et al.*, (2025).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo foi estruturada em três etapas principais: (i) síntese do nanocarbonato de cálcio (NCC) em escala laboratorial (NCClab), incluindo a concepção de um cenário de produção otimizada (NCCopt); (ii) ensaio em casa de vegetação com cultivo de alface, para verificar a viabilidade agrônômica preliminar do NCC como nanocorretivo; e (iii) aplicação integrada da ACV para quantificar os impactos ambientais da produção de NCC em abordagem berço ao portão (*cradle-to-gate*) e dos sistemas agrícolas alface de e soja em abordagem berço ao campo (*cradle-to-field*), sendo a alface apoiada por dados experimentais e a soja incluída como cultura representativa em cenário modelado. A ACV foi conduzida em conformidade com as diretrizes ISO 14040:2006 e ISO 14044:2009, seguindo as etapas de definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

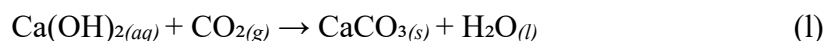
Conforme ilustrado na Figura 10, a fronteira berço ao campo representa uma opção intermediária entre berço ao portão e berço ao túmulo, pois estende a análise até o transporte e a aplicação no campo, sem incluir etapas de uso pelo consumidor e fim de vida. Por fim, foram comparados quatro cenários de manejo da acidez do solo: sem calagem, com calcário comercial, com NCClab e com NCCopt.

**Figura 10** – Representação esquemática das abordagens de ACV, considerando a abordagem do berço ao portão, do berço ao campo, do berço ao túmulo.



**Fonte:** Adaptado da ABNT NBR ISO 14044:2009.

Os procedimentos descritos nesse subitem foram executados pela equipe do projeto Agricarbono. A síntese do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ocorreu a partir do borbulhamento de uma corrente gasosa rica em  $\text{CO}_2$  em solução de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), promovendo a precipitação de carbonato de cálcio conforme a reação global (Equação 1):



A síntese foi conduzida em biorreator BioFlo 120 (Eppendorf), com vaso encamisado, empregando volume de trabalho compatível com o reator (5 L ou 10 L), conforme o ensaio. A agitação, a temperatura e a vazão de gás foram controladas pelo sistema, e o valor de pH do meio reacional foi monitorado continuamente (a lista de equipamentos está disponível no apêndice 5).

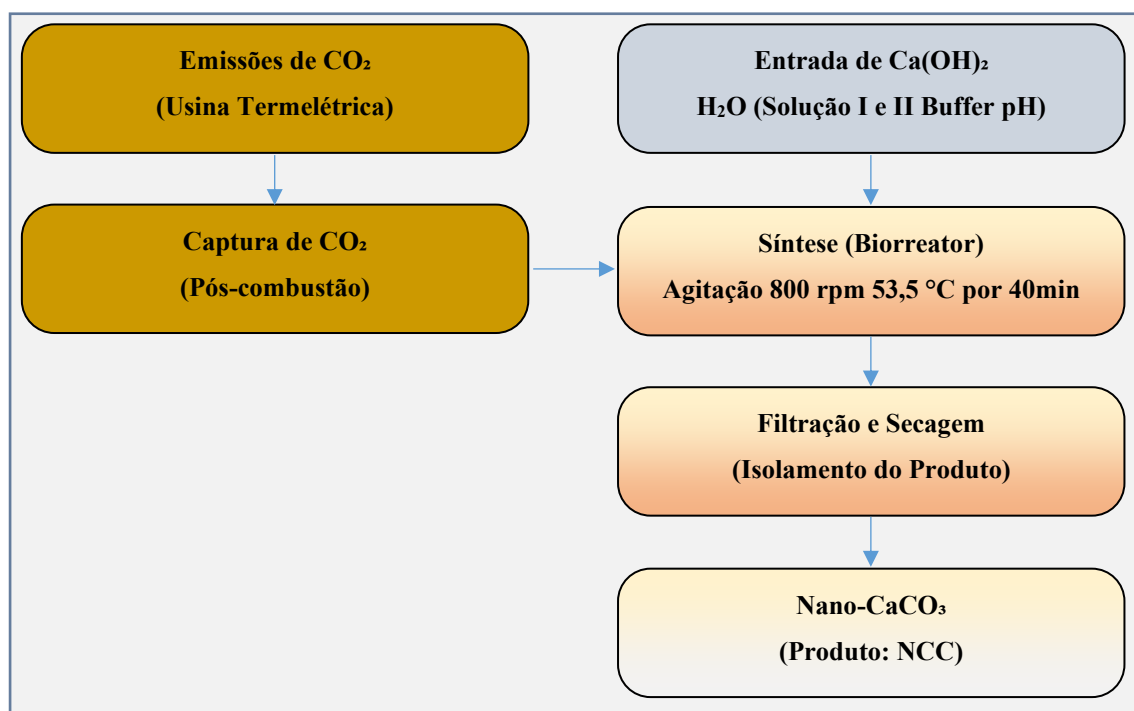
Preparo das soluções:

- Solução I: 9,905g de água destilada e 100,44 g de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ );
- Solução II: calibração do valor de pH utilizando soluções padrão SpecSol®: solução Buffer valor de pH+ por -0,02 a 25 °C+ por -0,2 °C e Solução *buffer* valor de pH 9+ por -0,02 a 25 °C.

Com o meio reacional no reator, iniciaram-se a agitação e o controle de temperatura. Em seguida, a corrente gasosa contendo  $\text{CO}_2$  foi introduzida no fundo do vaso por difusor, na vazão definida, promovendo transferência gás-líquido e reação de carbonatação. A progressão do processo foi acompanhada pelo valor do pH, pelo tempo de residência e por espectroscopia no infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR), até atingir o critério de término estabelecido nas notas técnicas, como a estabilização do valor de pH ou o tempo total de borbulhamento.

Recuperação do produto: após a reação, o sólido precipitado (NCC) foi recuperado por separação sólido-líquido (por exemplo: filtração e/ou centrifugação), seguido de lavagem para remoção de impurezas solúveis, e secagem até massa constante. A Figura 11 apresenta o fluxograma geral das etapas do processo, desde a alimentação de  $\text{CO}_2$  até a obtenção do produto seco.

**Figura 11** – Fluxograma das etapas de síntese do nanocarbonato de cálcio (NCC) a partir da captura de CO<sub>2</sub> de usina termelétrica, incluindo reação, separação e secagem.



**Fonte:** Autor – adaptado do Boletim Técnico Embrapa Agroenergia (2021).

#### 4.1 Etapa I – fixação de CO<sub>2</sub>

As soluções I e II foram combinadas (denominadas Solução III), inseridas no Biorreator, dando início à primeira etapa (Figura 12). Neste estudo, o termo *captura de CO<sub>2</sub>* refere-se à fixação do CO<sub>2</sub> em forma mineral (carbonatação) durante a reação com Ca(OH)<sub>2</sub>, utilizando uma mistura gasosa representativa de gás de chaminé.

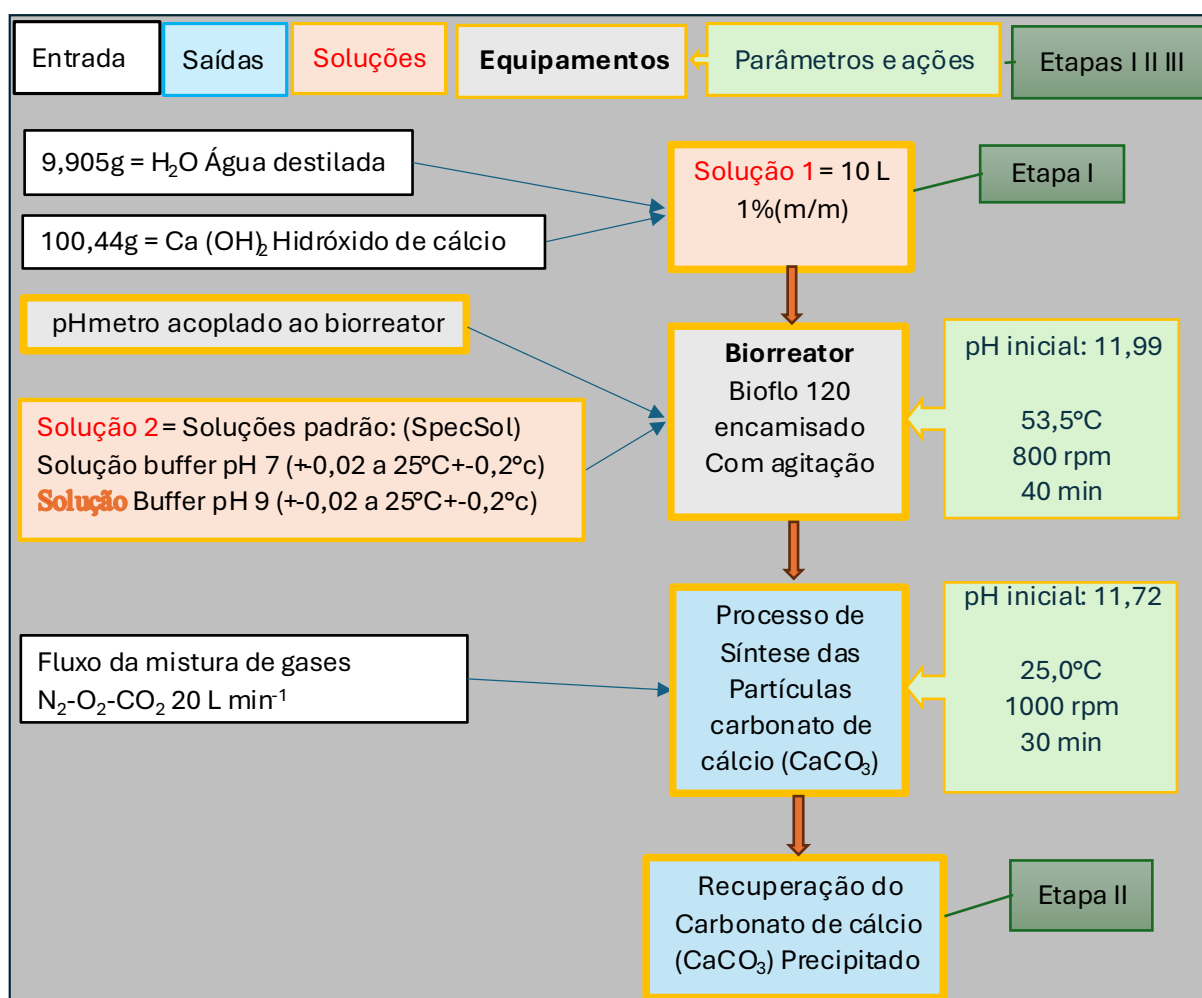
A agitação inicial para a homogeneização das soluções foi mantida em 800 rpm, com a temperatura de 53,5 °C durante 40 min, para garantir a solubilização completa do hidróxido de cálcio (Ca (OH)<sub>2</sub>).

A partir desse ponto, a velocidade de agitação foi aumentada para 1000 rpm, no início do borbulhamento do fluxo da mistura de gases N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> (White Martins, certificado 423493) com uma vazão de 20 L min<sup>-1</sup>. O valor do pH inicial mensurado foi de 11,72 e a temperatura medida foi de 25,0 °C, sendo feito o acompanhamento do valor do pH da suspensão a cada 5 minutos. A reação terminou quando o valor do pH alcançou 7 a 6, e o tempo foi de aproximadamente 30 minutos. Essa faixa foi adotada por representar a neutralização da solução e a formação estável do NCC, simulando condições compatíveis com aplicações agrícolas.

Ao longo da reação, especialmente a cada mudança significativa do valor de pH e ao final do processo, foram retiradas alíquotas da suspensão para acompanhamento por espectroscopia na região do infravermelho (FT-IR/ATR), utilizando espectrofotômetro PerkinElmer.

A escolha dessas condições operacionais foi definida pela equipe técnica do projeto, com base na necessidade de otimizar a dissolução dos reagentes e assegurar a eficiência da reação. Eventuais alternativas de síntese em temperatura ambiente podem ser investigadas em etapas futuras, com o objetivo de avaliar sua viabilidade técnica e energética no contexto da ACV.

**Figura 12** – Descrição do processo de fixação de CO<sub>2</sub> (Etapa I).



**Fonte:** Autor – adaptado Da Nota Técnica Embrapa Agroenergia (2021).

## 4.2 Etapa II – recuperação do nanocarbonato de cálcio precipitado

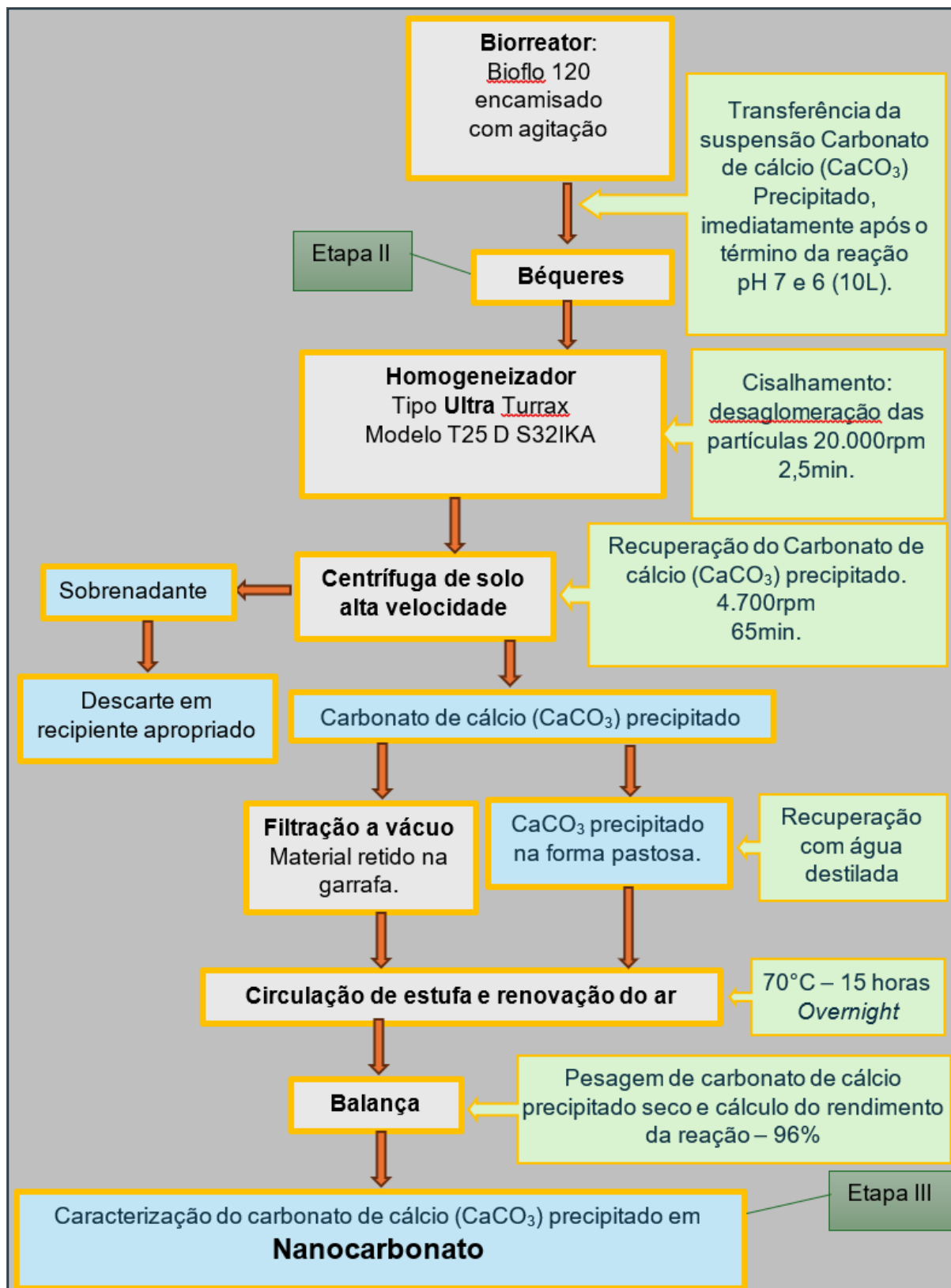
Após a conclusão da reação no biorreator (Figura 13), a suspensão contendo o carbonato de cálcio precipitado foi imediatamente transferida para béqueres. O valor do pH da suspensão, no momento da transferência, variava entre 6 e 7 para um volume total de 10 L. Em seguida, o material foi submetido a um processo de cisalhamento mecânico, para promover a desaglomeração das partículas. Esse procedimento foi realizado utilizando um homogeneizador UltraTurrax modelo T25 D S32/IKA, operando a 20000 rpm por dois minutos e meio, garantindo uma dispersão homogênea das partículas na suspensão.

A etapa seguinte envolveu a recuperação do carbonato de cálcio precipitado por meio de centrifugação. O processo foi conduzido em uma centrífuga de solo de alta velocidade (Thermo Fisher Scientific), com rotação de 4700 rpm, durante 65 min, incluindo as etapas de aceleração, permanência por 15 min na rotação requerida e desaceleração por 15 min. Após a centrifugação, o sobrenadante foi cuidadosamente separado e descartado em recipientes apropriados para o descarte de resíduos químicos, seguindo os protocolos de segurança estabelecidos.

O carbonato de cálcio precipitado como nanopartículas (ou NCC), retido no fundo dos tubos da centrífuga, foi submetido a um processo adicional de recuperação. Esse passo incluiu a lavagem com água destilada e subsequente filtração a vácuo, garantindo a remoção de impurezas residuais. O material recuperado apresentou-se em forma pastosa e foi, então, transferido para a secagem. A secagem do material foi realizada em uma estufa (Marconi) de circulação e renovação de ar (a 70 °C), durante um período aproximado de 15 horas (*overnight*). Esse procedimento visou remover a umidade residual do material, preparando-o para as etapas subsequentes de caracterização.

Após a secagem, o NCC seco foi cuidadosamente pesado para o cálculo do rendimento da reação, que atingiu 96 % m por m. Informações adicionais sobre o NCC estão disponíveis no Apêndice 3. Embora a reação química tenha gerado a precipitação do carbonato de cálcio, a obtenção de partículas na escala nano decorre da combinação entre as condições controladas de síntese (agitação, temperatura, valor do pH) e os procedimentos de separação e purificação aplicados. A caracterização morfológica das partículas, realizada por técnicas específicas (como a microscopia eletrônica), indicou a presença de partículas com diâmetro inferior a 100 nm, justificando sua classificação como nanocarbonato de cálcio.

**Figura 13** – Descrição do processo de recuperação do nanocarbonato de cálcio precipitado (Etapa II).



**Fonte:** Autor – adaptado da Nota Técnica Embrapa Agroenergia (2022).

### 4.3 Validação do NCC no cultivo da alface

Os procedimentos experimentais conduzidos em casa de vegetação pela equipe do projeto Agricarbono permitiram avaliar a viabilidade do uso do NCC como corretivo em solos destinados à agricultura. O cultivo de alface (*Lactuca sativa*) foi utilizado como modelo experimental, para gerar dados preliminares e subsidiar análises futuras. Alfaces foram plantadas em vasos distribuídos em lotes (L), Controle (C) e Dose (D) em uma casa de vegetação da Embrapa Hortaliças (Figura 14). As plantas foram colhidas e pesadas em 07/08/2022, para a obtenção da massa úmida. Em seguida, três dias após o corte, as amostras foram novamente pesadas e, após sete dias, realizou-se uma terceira pesagem, para a estimativa da massa seca total. Esses dados foram utilizados para embasar estudos voltados para a viabilidade técnica e ecológica da prática, bem como para discutir o potencial econômico associado ao NCC em mercados de crédito de carbono.

**Figura 14** – Validação da performance do NCC em alfaces cultivadas em vasos na estufa da Embrapa Hortaliças, com pesagem para estimativa da massa úmida e da massa seca total.



Fonte: Embrapa Hortaliças (2022).

O ensaio em casa de vegetação forneceu evidências experimentais para a aplicação do NCC em sistema hortícola sob condições controladas. Adicionalmente, os dados de biomassa podem contribuir para a construção de cenários e os inventários agrícolas em avaliações futuras com escopo ampliado, por exemplo:

em ACV do tipo berço ao campo, permitindo integrar o desempenho agrônômico à análise ambiental do uso do corretivo.

#### 4.4 Metodologia para a seleção do software para a ACV

A implementação da ACV em processos CCU exige uma seleção das ferramentas disponíveis no mercado, incluindo *softwares*, bases de dados e metodologias específicas para a quantificação dos impactos ambientais e capazes de representar, de forma consistente, tanto a produção do NCC quanto os sistemas agrícolas de soja e alface. Para garantir a confiabilidade da análise, foram escolhidos *softwares* e bases de dados amplamente reconhecidos na comunidade científica e industrial.

Em uma primeira etapa, há a necessidade de considerar critérios para a escolha do *software*, como:

- Aderência às normas internacionais de ACV;
- Simplicidade e eficiência de uso;
- Custos acessíveis ou versões gratuitas para acadêmicos ou pesquisadores institucionais;
- Disponibilidade de bases de dados consolidadas para processos energéticos, industriais e agrícolas;
- Aplicações com base de dados locais, via servidores ou *on-line*;
- *Website* próprio com novidades, acesso a informações, fóruns e plataformas;
- Linguagem de acesso usadas para *software* (inglês e unidades americanas ou sistema de unidades europeias e globais), e linguagens dos cursos e das tutorias existentes;
- Área de aplicabilidade e trabalhos confirmando o uso (como pegadas de carbono e hídrica, *design* de produto, geração de declarações ambientais de produtos e definição de indicadores chave de *performance*);
- Banco de dados e bibliotecas disponíveis no mercado e seus custos.

Em uma segunda fase, a escolha foi baseada em questões econômicas e na disponibilidade do *software* no local de trabalho. Esses dois argumentos foram encontrados em outras metodologias em artigos, teses, dissertações e trabalhos científicos estudados durante a revisão bibliográfica. Uma compilação sobre os programas foi elaborada usando o nome do *software*; breve descrição de seu uso, das características gerais e da disponibilidade.

O openLCA 2.5.0 foi adotado como a ferramenta de modelagem, permitindo a estruturação dos sistemas de produção e o cálculo detalhado dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Para compor o inventário, foram utilizados banco de dados específicos, como o Ecoinvent 3.7, que fornece informações sobre fluxos elementares e processos industriais, e o Agri-footprint 5: *economic; energy and mass to agri-footprint* 6, voltado para processos agrícolas e consumo de recursos naturais. Os métodos de avaliação de impacto selecionados foram:

- IPCC 2013 (100 anos), para o cálculo do potencial de aquecimento global (GWP);
- ReCiPe 2016 Midpoint (H), para a quantificação de múltiplas categorias de impacto (mudança do clima, toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica, ecotoxicidade em água doce, eutrofização, uso de recursos fósseis, uso da água, formação de material particulado, entre outras).

Esses métodos foram escolhidos por sua ampla aceitação na comunidade científica, pela compatibilidade com as bases de dados empregadas e por possibilitarem a comparação com estudos recentes de ACV em sistemas agrícolas e em rotas de CCU.

Considerando que a matriz energética do Brasil é majoritariamente composta por fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar), os fatores de emissão globais fornecidos pelo IPCC podem superestimar os impactos locais, especialmente no que diz respeito à geração de energia elétrica.

#### 4.5 Seleção das categorias de impacto da ACV

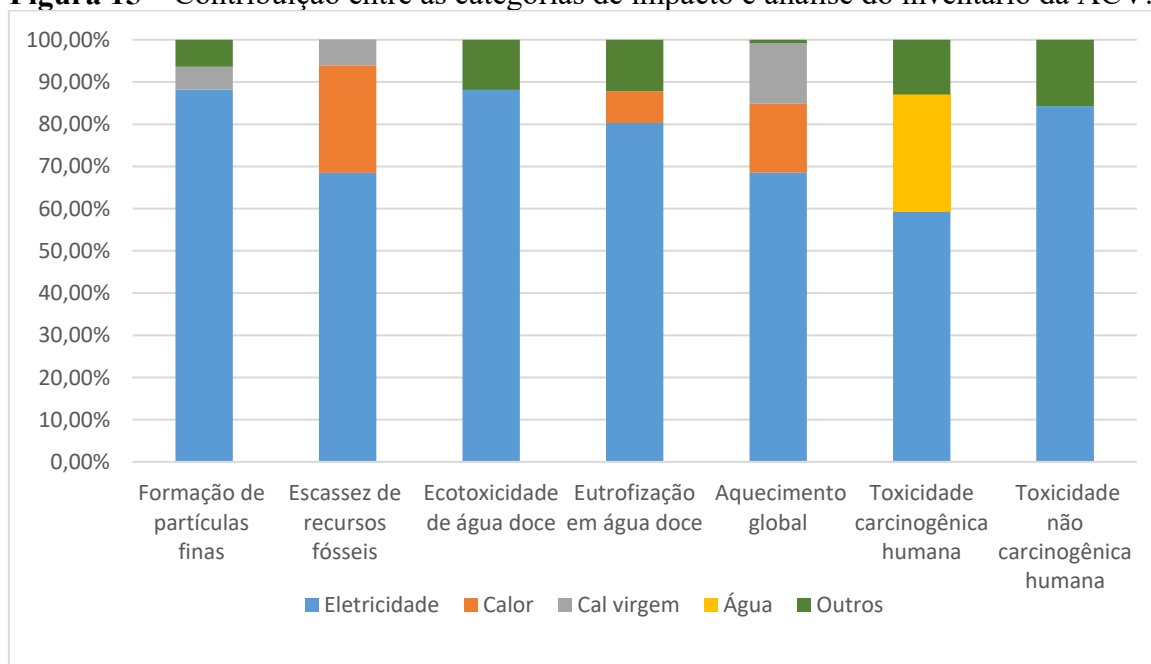
No presente estudo, foram calculadas todas as categorias de impacto disponíveis no método ReCiPe 2016 Midpoint (H), em conjunto com o potencial de aquecimento e o aumento de temperatura global do método IPCC 2013 (20 e 100 anos). Entretanto, para a análise e discussão dos resultados, foram selecionadas como categorias principais:

- Mudança do clima;
- Toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica;
- Ecotoxicidade em água doce;
- Eutrofização em água doce;

- Escassez de recursos fósseis;
- Uso da água;
- Formação de material particulado fino.

Essa seleção baseou-se em dois critérios principais. O primeiro foi a relevância científica e metodológica das categorias para sistemas agrícolas e para rotas de CCU, conforme apontado em revisões recentes sobre ACV de fertilizantes e sistemas de produção de alimentos (Banboukian, 2025). O segundo critério foi a sensibilidade das categorias aos processos avaliados (Figura 15), priorizando indicadores em que a produção do NCC e o manejo agrícola apresentam contribuições significativas ao longo do ciclo berço ao campo, conforme evidenciado na literatura para sistemas agrícolas intensivos em insumos e energia (Mousavi *et al.*, 2022).

**Figura 15** – Contribuição entre as categorias de impacto e análise do inventário da ACV.



**Fonte:** Autor – adaptado do openLCA (2026).

Embora a validação agrônômica experimental do NCC nesta tese tenha sido conduzida em casa de vegetação apenas com alface, a soja não foi objeto de ensaio experimental no presente estudo, tendo sido incluída na etapa de ACV por se tratar de uma cultura estratégica e representativa de sistemas extensivos no Brasil, amplamente analisada na literatura de ACV por sua relevância em emissões associadas a fertilizantes, operações mecanizadas e dinâmica de uso da terra (Brito, 2022). Assim, a inclusão de soja e alface permite discutir o desempenho

ambiental do corretivo em dois perfis contrastantes de sistema produtivo, hortícola intensivo (com maior dependência de irrigação e manejo frequente) e grão extensivo (com maior influência de emissões de  $N_2O$  e consumo de diesel), sem implicar que ambos tenham sido validados experimentalmente na mesma etapa (Banboukian, 2025).

Os cenários agrícolas de soja e alface apresentaram contribuições relevantes para diferentes categorias de impacto, com pontos críticos associados às particularidades de manejo de cada cultura (Tabela 5).

Estudos recentes de ACV aplicados a fertilizantes e insumos agrícolas têm destacado a relevância de categorias como mudança do clima, eutrofização, ecotoxicidade, toxicidades humanas e uso de recursos, além de reforçar a importância de inventários consistentes e dados regionalizados. Por exemplo, Egas *et al.*, (2023) discutem a variabilidade metodológica em ACV de fertilizantes de base biogênica e apontam que fronteiras, alocação e tratamento de carbono explicam parte expressiva das diferenças de resultados entre estudos.

Em paralelo, revisões e aplicações recentes em sistemas agrícolas e hortícolas mostram que fertilizantes nitrogenados e energia associada à sua produção e ao uso frequentemente aparecem como pontos críticos ambientais nas cadeias agroalimentares (Egas *et al.*, 2023).

**Tabela 5** – Principais aspectos para soja e alface.

| Aspecto                                | Soja                                                                                                            | Alface                                                                                                |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Unidade funcional</b>               | 1 t de grão colhido (ou 1 ha cultivado)                                                                         | 1 t de alface fresca (ou 1 ha cultivado)                                                              |
| <b>Sistema de cultivo</b>              | Extensivo, grandes áreas, mecanizado                                                                            | Intensivo, pequenas áreas, alta irrigação                                                             |
| <b>Principais insumos</b>              | Fertilizantes NPK; defensivos (herbicidas/fungicidas); combustível (diesel)                                     | Fertirrigação; pesticidas; alta demanda hídrica                                                       |
| <b>Uso de energia</b>                  | Alto em mecanização (tratores, colheita)                                                                        | Moderado em mecanização; alto em irrigação                                                            |
| <b>Uso de água</b>                     | Relativamente menor, dependendo da região                                                                       | Muito elevado (hortaliça folhosa sensível)                                                            |
| <b>Emissões principais</b>             | $N_2O$ associado à dinâmica do nitrogênio no sistema; $CO_2$ do diesel; mudança no uso da terra (LUC)           | $N_2O$ e lixiviação de fertilizantes; resíduos orgânicos pós-colheita                                 |
| <b>Hotspots ambientais</b>             | Fertilizantes nitrogenados ( $N_2O$ ); mudança no uso da terra (LUC); eutrofização por escoamento de nutrientes | Irrigação intensiva (pegada hídrica); uso de pesticidas (ecotoxicidade); perdas pós-colheita elevadas |
| <b>Categorias de impacto críticas)</b> | Aquecimento global (GWP); uso da terra; eutrofização                                                            | Consumo de água; ecotoxicidade; geração de resíduos                                                   |

**Fonte:** Autor (2025).

A Mudança do clima é central neste trabalho por estar diretamente associada às metas do acordo de Paris e à agenda pós-COP30, além de ser o indicador mais utilizado em estudos de ACV agrícola e de rotas de CCU. Ela permite avaliar, de forma quantitativa, o efeito combinado da produção de NCC, da calagem (calcário, NCClab e NCCopt), das emissões de  $N_2O$  do solo e do consumo de combustíveis fósseis nos sistemas de soja e alface.

As categorias de toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica foram selecionadas porque os resultados preliminares mostraram valores elevados associados à produção de NCC em escala laboratorial (NCClab), refletindo emissões de substâncias tóxicas ao longo das cadeias de insumos químicos e energia. Trabalhos recentes em ACV de fertilizantes e de nanomateriais indicam que melhorias em emissões de  $CO_2$  podem estar associadas a *trade-offs* (isto é, compensações ambientais, quando a redução de um impacto ocorre à custa do aumento de outro), reforçando a necessidade de considerar esses indicadores em avaliações de tecnologias de CCU.

A Ecotoxicidade em água doce e a Eutrofização em água doce são particularmente relevantes em sistemas agrícolas, devido ao uso de fertilizantes e defensivos, e ao risco de perda de nutrientes para corpos hídricos. Estudos de ACV em alface e outras hortaliças mostram que essas categorias estão entre as mais sensíveis a mudanças no manejo de insumos e no desenho do sistema produtivo, afetando diretamente a qualidade da água.

A escassez de recursos fósseis foi incluída por refletir o uso de combustíveis e energia ao longo das cadeias de produção do NCC e de insumos agrícolas. No caso do NCC, essa categoria é sensível às escolhas de fonte de calor e de matriz elétrica; nos sistemas de soja e alface, está fortemente relacionada ao uso de diesel em operações mecanizadas e à energia demandada pela irrigação em sistemas intensivos. avaliações recentes de rotas de CCU para produção de carbonatos apontam o consumo de recursos fósseis como um dos principais *trade-offs* em relação a rotas convencionais.

O uso da água é uma categoria crucial, sobretudo para a cultura da alface, que depende de irrigação intensiva. Estudos de ACV em sistemas hortícolas, incluindo produção em campo aberto, estufas e fazendas verticais, apontam o consumo de água como um dos indicadores mais relevantes para avaliar a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas. No caso da soja, o uso da água tem menor peso relativo, mas contribui para a compreensão dos *trade-offs* entre intensificação e pressão sobre recursos hídricos.

A formação de material particulado fino ( $PM_{2.5}^{1*}$ ) foi selecionada por sua importância para a saúde humana e a qualidade do ar, estando associada, principalmente, à queima de combustíveis fósseis em geração de energia e no uso de diesel em máquinas agrícolas. Estudos de ACV ressaltam que reduções em emissões de GEE não implicam necessariamente redução proporcional de poluentes atmosféricos locais, sendo relevante avaliar material particulado em paralelo à categoria de mudança do clima.

As demais categorias de impacto disponíveis no método ReCiPe 2016 Midpoint (H) (como acidificação terrestre, formação de ozônio fotoquímico e uso da terra) foram calculadas e analisadas como apoio, mas não são discutidas em detalhe neste trabalho por apresentarem menor sensibilidade relativa às variações entre os cenários avaliados ou por não alterarem as conclusões principais em relação ao desempenho comparativo entre calcário, NCClab e NCCopt nos sistemas de soja e alface.

Embora a categoria de uso da terra seja reconhecida como relevante em estudos de ACV agrícola — especialmente, quando se avaliam mudanças de uso da terra (LUC) e impactos sobre biodiversidade, no presente trabalho, o uso da terra foi considerado apenas como indicador de apoio. As razões principais são: (i) a modelagem adotada representa sistemas de cultivo já estabelecidos, sem inclusão explícita de cenários de desmatamento ou conversão de ecossistemas naturais; (ii) as diferenças entre os quatro cenários de manejo (sem calagem, calcário, NCClab, NCCopt) manifestam-se, principalmente, na produtividade por hectare, o que é refletido de forma mais sensível em categorias como mudança do clima, eutrofização, uso da água e toxicidades; e (iii) os fatores de caracterização de uso da terra disponíveis no método ReCiPe 2016 Midpoint (H) apresentam maior incerteza e dependem fortemente de hipóteses sobre funções do solo, não alterando, neste caso, as conclusões principais do estudo.

#### 4.6 Condução da avaliação do ciclo de vida

A ACV foi conduzida conforme as diretrizes das normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2009, compreendendo as fases de objetivo e escopo, inventário, avaliação de impacto e interpretação.

---

<sup>1</sup>Material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) = fração bem pequena dessas partículas, com diâmetro aerodinâmico  $\leq 2,5$  micrômetros (0,0025mm). Por serem tão pequenas, essas partículas não são filtradas eficientemente pelo nariz e pela garganta, entrando profundamente nos pulmões e podendo até atingir a circulação sanguínea.

Objetivo do estudo: quantificar e comparar os impactos ambientais associados à produção de NCC via CCU e à sua aplicação como corretivo da acidez do solo em sistemas agrícolas de soja e alface, considerando cenários com calcário, NCCLab, NCCopt e sem calagem.

Objetivo da ACV: avaliar, em perspectiva de ciclo de vida, (i) a produção de NCC (NCCLab e NCCopt) em escopo berço ao portão, e (ii) os sistemas agrícolas de soja e alface em escopo berço ao campo, identificando pontos críticos (*hotspots*) e comparando o desempenho ambiental entre cenários sob unidades funcionais definidas.

#### 4.7 Definição do objetivo e do escopo

O objetivo principal foi estimar a pegada de carbono associada à conversão de CO<sub>2</sub> em nanocarbonato de cálcio em condições laboratoriais, adotando a abordagem de ACV conforme as diretrizes, das normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2009.

A unidade funcional da produção de NCC foi definida inicialmente como 1g de NCC, por refletir a escala do experimento laboratorial e facilitar o balanço de massa e energia do inventário. Para fins de comparabilidade e interpretação em termos de aplicação e escala, os resultados foram também reescalados e reportados por 1 kg de NCC, mantendo a proporcionalidade dos fluxos do inventário.

Assim, a referência em gramas e em quilogramas corresponde ao mesmo produto — diferindo apenas pela conveniência de apresentação e comparação —, necessário para comparação com estudos de CCU e mineralização (European Commission, 2010).

No experimento, foi obtida uma produção total de 135,09 g de NCC, a partir da captura de 95,100 g de CO<sub>2</sub>, sendo este valor utilizado como base de cálculo para estimar a eficiência do processo. Ressalta-se, no entanto, que a eficiência observada em laboratório não representa, necessariamente, a realidade em escala industrial, uma vez que variáveis como rendimento, consumo energético, perdas de processo e controle de emissões e manutenção das características nanométricas do produto podem se comportar de forma distinta em plantas de grande porte. No caso do NCC, o escalonamento não envolve apenas a reprodução das proporções do processo, mas também a verificação de que o material obtido mantém as propriedades físico-químicas e morfológicas compatíveis com a formação de nanopartículas de carbonato de cálcio. Portanto, os dados laboratoriais apresentados nesta fase têm caráter exploratório e foram utilizados como referência inicial para a modelagem ambiental.

#### 4.7.1 Objetivo da ACV

Os objetivos da avaliação do ciclo de vida (ACV) desenvolvida nesta tese são:

- Quantificar e comparar os impactos ambientais associados: (i) à produção de nanocarbonato de cálcio (NCC) a partir da captura e do uso de CO<sub>2</sub> em escala laboratorial (NCClab) e em um cenário de processo otimizado (NCCopt), conforme a abordagem berço ao portão; e (ii) ao uso de diferentes corretivos de acidez do solo (calcário agrícola, NCClab e NCCopt), em comparação com o cenário sem calagem, em sistemas agrícolas de soja e alface, de acordo com a abordagem berço ao campo;
- Identificar *hotspots* de emissões e consumo de recursos ao longo das cadeias de produção do NCC e dos sistemas agrícolas, com ênfase em categorias de impacto relacionadas ao clima, à toxicidade humana, à ecotoxicidade, ao uso de recursos fósseis e ao uso da água;
- Fornecer subsídios para a discussão do papel do NCC em estratégias de descarbonização da agricultura e de economia circular do carbono.

#### 4.7.2 O escopo da ACV

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), um sistema de produto é definido como o “conjunto de processos elementares, incluindo fluxos de materiais e produtos, que desempenham uma ou mais funções específicas e representam o ciclo de vida de um produto”.

O escopo da ACV foi definido de acordo com as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2009, e compreende dois subsistemas principais, modelados de forma articulada:

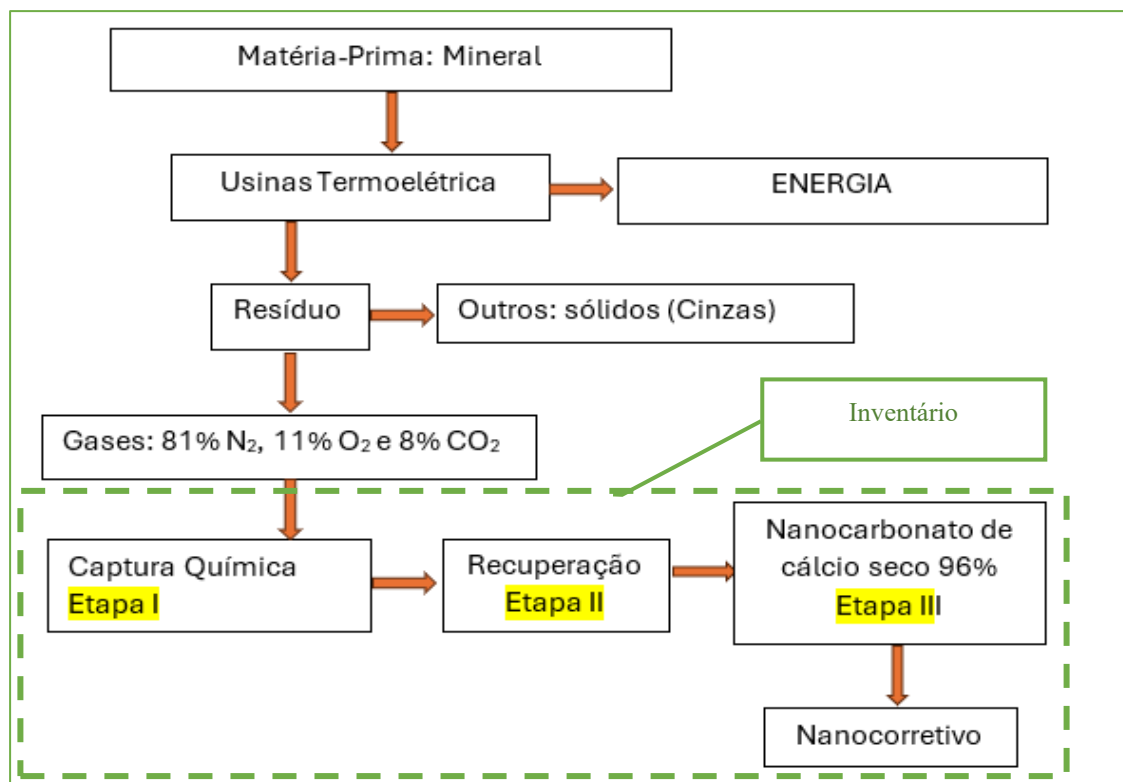
##### (a) Produção de nanocarbonato de cálcio (NCC)

- Sistema de produto: produção de NCC a partir da captura de CO<sub>2</sub> de emissões gasosas de uma usina termelétrica (ver no Apêndice 4), e sua reação com hidróxido de cálcio em meio aquoso, incluindo etapas de reação, separação, lavagem, secagem e obtenção do produto. Embora os ensaios laboratoriais tenham utilizado uma

mistura gasosa/um suprimento de CO<sub>2</sub> como alimentação do reator, neste estudo o CO<sub>2</sub> foi modelado como CO<sub>2</sub> de origem fóssil do banco de dados (*carbon dioxide, fossil*), utilizado como *proxy* do CO<sub>2</sub> capturado, por limitações de disponibilidade de conjuntos de dados específicos para CO<sub>2</sub> pós-combustão.

- Rotas consideradas:
  - Rota laboratorial, representando o NCClab;
  - Rota conceitual de produção otimizada, representando o NCCopt.
- Funções do sistema de produto: o sistema tem como função a mitigação da pegada de carbono por meio da captura e conversão de CO<sub>2</sub> em NCC. A aplicação agrícola do NCC como nanocorretivo de solo é considerada uma função potencial do produto, e será abordada em etapa posterior do projeto, por meio de uma ACV específica.
- Unidade funcional: a unidade funcional usada nesta ACV foi de 1 kg de NCC.
- Fronteira do sistema: A análise considera o ciclo do berço ao portão (Figura 16), abrangendo desde a captura de CO<sub>2</sub> até a produção do NCC, sem incluir as etapas de uso final ou descarte, mas incluindo:
  - Extração e processamento de matérias-primas (Ca (OH)<sub>2</sub>, energia, água);
  - Captura e condicionamento do CO<sub>2</sub>;
  - Operações unitárias de síntese (reação, agitação, controle de temperatura, cisalhamento);
  - Etapas de separação, lavagem, filtração e secagem;
  - Consumo de energia elétrica e térmica associado às operações;
  - Emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub> e outros poluentes;
  - Não são incluídas nesse subsistema as etapas de transporte até a fazenda, uso agrícola ou destinação final do NCC.

**Figura 16** – Sistema de produto e limite de fronteira em destaque.



**Fonte:** Autor – adaptado da nota técnica Embrapa Agroenergia (2022).

(b) Sistemas agrícolas de soja e alface

- Sistema de produto: produção de grão de soja e de alface fresca em sistemas de cultivo representativos de condições brasileiras, considerando, para a alface, solo do Distrito Federal submetido a diferentes estratégias de correção da acidez do solo. Embora a validação experimental do NCC nesta tese tenha sido conduzida em casa de vegetação apenas com alface, a soja foi incluída na etapa de ACV por ser cultura estratégica e representativa de sistemas extensivos no Brasil, permitindo avaliar o desempenho ambiental do corretivo em um sistema contrastante quanto ao cultivo hortícola intensivo, sem implicar validação agronômica experimental para a soja nesta etapa.
- Cenários de manejo da acidez do solo:
  - C1 – sem calagem (solo ácido, sem aplicação de corretivo);
  - C2 – com calcário agrícola convencional;
  - C3 – com NCClab (perfil de NCC em rota laboratorial);
  - C4 – com NCCopt (perfil de NCC em rota otimizada).

- Unidades Funcionais (UF-agrícolas):
  - Principal: 1 kg de produto colhido (1 kg de grão de soja; 1 kg de alface fresca);
  - Secundária: 1 ha cultivado, utilizada em análises de sensibilidade.
- Fronteiras do sistema: abordagem berço ao campo, incluindo:
  - Produção de insumos e transporte dos fluxos considerados na modelagem, como fertilizantes, sementes ou mudas, defensivos, combustível e energia elétrica, não tendo sido incluído, no presente estudo, o transporte do NCC até o local de produção;
  - Preparo de solo, semeadura/transplante, tratos culturais, aplicação de corretivos e fertilizantes, irrigação (alface), colheita;
  - Emissões de campo ( $\text{CO}_2$  da reação de carbonatos,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NH}_3$  do solo, emissões associadas à queima de combustível em máquinas agrícolas);
  - Transporte do corretivo até a propriedade rural, quando aplicável (calcário, NCClab, NCCopt).

Não são consideradas, no escopo-base, as etapas de processamento pós-colheita, varejo, consumo e fim de vida da embalagem, as quais são discutidas apenas de forma qualitativa.

- Procedimentos de alocação: nas etapas de campo e nas próximas avaliações em casa de vegetação, deve-se mensurar as distâncias entre produção e uso, bem como as áreas ocupadas com ênfase na atribuição dos impactos ambientais ao processo de produção.
- Metodologia de AICV e tipos de impactos: a avaliação do ciclo de vida foi realizada com o *software* openLCA, utilizando o método IPCC 2013 para calcular o potencial de aquecimento global (GWP) e o potencial de temperatura global (GTP).
- Requisitos referentes a dados coletados: os dados primários foram obtidos diretamente das emissões da usina termoeletrica e informações referentes ao uso dos dados na metodologia foram comparadas com produtos comerciais, como no caso do NCC obtido e das normas do mercado para o uso do calcário comercial. Esses dados foram mensurados diretamente do processo de síntese do NCC, enquanto dados secundários foram extraídos do banco dados Agri-foodprint e Ecoinvent (openLCA), para complementar a análise de impacto pelo ACV.

- Pressupostos: os resultados obtidos em escala laboratorial foram utilizados como referência para a construção de um cenário prospectivo de transposição do método para a escala industrial, considerando sua plausibilidade técnica e ambiental.
- Escolha de valores e elementos opcionais: foram utilizados valores médios de emissões e consumo energético, considerando condições-padrão de temperatura e pressão (STP) para cálculos relacionados à conversão de CO<sub>2</sub>.
- A campo foram adotados valores médios representativos de condições brasileiras recentes, com ajustes, quando necessário, para apresentar coerência com o contexto temporal (2022-2025) dos experimentos e dos cenários.
- Limitações: a análise limita-se à fase de produção do NCC, não abrangendo o ciclo de vida completo do produto, como a aplicação agrícola e o descarte. Outros pontos relevantes são a extração do CO<sub>2</sub>, e o processamento dos gases e emissões diretamente no local onde são produzidos.

#### 4.8 Análise de inventário

As Tabelas 6 e 7 apresentam o inventário simplificado (entradas e saída) modelado no openLCA para a produção de 1 kg de NCC nos cenários NCClab e NCCopt, respectivamente. Esses dados foram obtidos de medições diretas, documentos técnicos e inventários disponibilizados (os cálculos estão disponíveis no Apêndice 2). Como dados secundários, foram utilizadas as bibliotecas *AgriFootprint* and *Ecoinvent* para complementar os dados do inventário.

A lista de equipamentos e os seus respectivos consumos de energia estão apresentados no Apêndice 5.

**Tabela 6** – Inventário (entradas e saída) do cenário NCClab (por 1 kg de NCC).

| Tipo    | Fluxo                                          | Quantidade | Unidade |
|---------|------------------------------------------------|------------|---------|
| Entrada | Elettricidade, média tensão                    | 872,44000  | kWh     |
| Entrada | Cal virgem moída/embalada ( <i>quicklime</i> ) | 0,56020    | kg      |
| Entrada | Água de torneira (processo)                    | 73,28440   | kg      |
| Entrada | Água de torneira (auxiliar/limpeza)            | 0,18000    | kg      |
| Entrada | Dióxido de carbono (captura/CCU)               | 0,44000    | kg      |
| Saída   | Nanocarbonato de cálcio (NCC)                  | 1,00000    | kg      |

**Fonte:** Autor – adaptado do openLCA (2025).

**Tabela 7** – Inventário (entradas e saída) do cenário NCCopt (por 1 kg de NCC)

| Tipo    | Fluxo                                          | Quantidade | Unidade |
|---------|------------------------------------------------|------------|---------|
| Entrada | Elettricidade, média tensão                    | 14,66000   | kWh     |
| Entrada | Calor (escala central ou pequena)              | 2,73700    | kWh     |
| Entrada | Cal virgem moída/embalada ( <i>quicklime</i> ) | 0,56020    | kg      |
| Entrada | Água de torneira (processo)                    | 73,28440   | kg      |
| Entrada | Água de torneira (auxiliar/limpeza)            | 0,18000    | kg      |
| Entrada | Dióxido de carbono (captura/CCU)               | 0,44000    | kg      |
| Saída   | Nanocarbonato de cálcio (NCC)                  | 1,00000    | kg      |

**Fonte:** Autor – adaptado do openLCA (2025).

O CO<sub>2</sub> considerado no inventário corresponde ao gás de alimentação do processo de carbonatação, oriundo da mistura gasosa representativa de emissões pós-combustão, utilizada como insumo reagente na síntese do NCC.

Para compor o inventário dos sistemas agrícolas em abordagem berço ao campo (*cradle-to-field*), foram utilizados processos agrícolas provenientes de bases de dados integradas ao openLCA, complementando os dados agrônômicos definidos para os diferentes cenários (com ou sem NCC).

Nos cenários com NCC (alface e soja), a operação Aplicação de Calcário foi considerada igual a zero, uma vez que se assume que o nanocarbonato, aplicado em baixas doses e com alta reatividade, poderia ser distribuído com a adubação, sem demandar uma passada específica de máquina exclusivamente para calagem.

Para a alface, foi utilizado o processo *lettuce361 production | lettuce | Cutoff, U - GLO*<sup>2</sup>, (Tabela 8) como representação de sistemas hortícolas. A quantidade de NCC (lab. e opt.) foi definida em 0,004320kg de NCC por quilograma de alface, tomando como referência a dose de 0,00502kg de calcário comercial por quilograma de alface utilizada no inventário convencional. A redução de massa aplicada ( $\approx 14\%$ ) reflete maior eficiência neutralizante do NCC em relação ao calcário agrícola. Para fins de modelagem, adotou-se para o calcário comercial de referência um PRNT aproximado de 80, em comparação ao PRNT de 93 % indicado no laudo técnico do NCC, o que é coerente com a relação entre as doses modeladas. O laudo do NCC indica teor de CaCO<sub>3</sub> de 93,6 %, poder de neutralização (PN) de 95 % e PRNT de 93 %, com 94 % do material

<sup>2</sup>*Cutoff = Cutoff, U - GLO* indica que o processo foi modelado segundo o sistema ecoinvent “*allocation, cut-off by classification*” (Cutoff), em uma versão *unit process* (U) e com representatividade global (GLO). Nesse modelo, materiais recicláveis/fluxos secundários entram no sistema com carga ambiental zero no ponto de entrada, e os impactos são atribuídos ao produto primário que os gerou; assim, o inventário considera os encargos até a geração do resíduo/reciclável, mas não incorpora impactos “a montante” do material reciclado recebido. Dataset não é específico do Brasil (caso da alface GLO = global).

passando pela peneira nº 50, valores substancialmente superiores aos mínimos exigidos para calcários industrializados (PN 67 % e PRNT 45 %).

**Tabela 8** – Inventário simplificado (entradas e saídas) do cenário Alface: C1, C2, C3 e C4.

| Cenário                 | Tipo    | Fluxo                 | Quantidade | Unidade |
|-------------------------|---------|-----------------------|------------|---------|
| <b>C1: sem calagem</b>  | Entrada | Calcário              | 0,000000   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Alface                | 0,381000   | kg      |
| <b>C2: com calcário</b> | Entrada | Calcário              | 0,005020   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000038   | ha      |
|                         | Saída   | Alface                | 1          | kg      |
| <b>C3: com NCCLab</b>   | Entrada | NCClab                | 0,004320   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Alface                | 1          | kg      |
| <b>C4: com NCCopt</b>   | Entrada | NCCopt                | 0,004320   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Alface                | 1          | kg      |

**Fonte:** Autor – adaptado do openLCA (2026).

Para a soja, foi selecionado o processo *soybean production | soybean | Cutoff, U - BR-MT*, (Tabela 9) por representar condições de produção brasileira no estado de Mato Grosso compatíveis com a discussão de sistemas extensivos. A modelagem baseou-se no inventário secundário disponível no openLCA, com ajuste da dose de corretivo. A entrada de NCC (lab. e opt.) foi fixada em 0,036000 kg de NCC por quilograma de grãos, a partir da dose de 0,04185 kg de calcário comercial por quilograma de soja. Mantém-se, portanto, a mesma lógica de redução de massa em função da maior pureza, finura e reatividade do NCC em comparação ao calcário convencional, respaldada pelos parâmetros de qualidade apresentados no laudo técnico.

**Tabela 9** – Inventário simplificado (entradas e saídas) do cenário Soja: C1, C2, C3 e C4.

| Cenário                 | Tipo    | Fluxo                 | Quantidade | Unidade |
|-------------------------|---------|-----------------------|------------|---------|
| <b>C1: sem calagem</b>  | Entrada | Calcário              | 0,000000   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Soja                  | 0,800000   | kg      |
| <b>C2: com calcário</b> | Entrada | Calcário              | 0,041850   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000089   | ha      |
|                         | Saída   | Soja                  | 1          | kg      |
| <b>C3: com NCCLab</b>   | Entrada | NCCLab                | 0,036000   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Soja                  | 1          | kg      |
| <b>C4: com NCCopt</b>   | Entrada | NCCopt                | 0,036000   | kg      |
|                         | Entrada | Aplicação de calcário | 0,000000   | ha      |
|                         | Saída   | Soja                  | 1          | kg      |

**Fonte:** Autor – adaptado do openLCA (2026).

#### 4.9 Impacto ambiental do ciclo de vida (IACV)

A avaliação de impacto ambiental foi realizada no *software* openLCA, utilizando o método IPCC 2013 para a pegada de carbono (GWP e GTP para 20 e 100 anos) e as categorias de ponto médio do método ReCiPe 2016 Midpoint (H) consideradas mais relevantes para o estudo, incluindo mudança do clima, toxicidade humana, ecotoxicidade em água doce, eutrofização, escassez de recursos fósseis, uso da água e formação de material particulado.

Logo após completar as entradas e saídas no inventário, houve a necessidade de selecionar o método de avaliação de impactos. Em nosso caso, selecionamos o IPCC13. A interface exibe categorias de impacto, como mudanças climáticas (GWP 100a), camada de

ozônio (ODP 100a) e eutrofização (EP 100a), com suas respectivas medições em equivalentes de CO<sub>2</sub>, CFC-11 e PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

#### **4.10 Interpretação dos resultados**

Os resultados obtidos foram analisados de forma comparativa, identificando as etapas da ACV com maior contribuição para os impactos ambientais. Gráficos e tabelas foram utilizados para facilitar a interpretação e visualização dos impactos. Os resultados dos impactos ambientais foram expressos nas categorias de impacto como mudança climática em potencial de aquecimento global (GWT) e potencial de temperatura global (GTP).

O GWP mede o efeito cumulativo no aquecimento global causado pelas emissões de um gás ao longo de um período específico, enquanto o GTP avalia o impacto de um gás na temperatura média global em um ponto específico no tempo.

Ambas as métricas são utilizadas em avaliações ambientais para entender e comparar os impactos climáticos de diferentes gases, auxiliando na formulação de políticas climáticas e no desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis.

Como em qualquer estudo de avaliação do ciclo de vida (ACV) e de tecnologia em desenvolvimento, os resultados apresentados nesta tese devem ser interpretados sob a ótica de algumas limitações metodológicas e de dados, sintetizadas nos subitens a seguir.

#### **4.11 Dependência de dados secundários e representatividade**

Embora tenham sido utilizados dados primários para caracterizar a síntese do NCC em escala laboratorial (NCClab), uma parte relevante do inventário de ciclo de vida baseou-se em dados secundários provenientes de bases como Ecoinvent e AgriFootprint, além de estatísticas oficiais. Essa dependência de dados secundários pode limitar a precisão e a representatividade regional e temporal dos resultados, especialmente para insumos agrícolas, produção de calcário e matriz energética. Em alguns casos, processos foram aproximados por tecnologias análogas disponíveis nas bases, introduzindo incertezas adicionais. A qualificação qualitativa dessas incertezas, elaborada com base na lógica da matriz Pedigree, encontra-se apresentada no Apêndice 7.

#### **4.12 Fronteiras do sistema: berço ao portão e berço ao campo, sem berço ao túmulo**

Neste trabalho, a ACV da produção de NCC (NCClab e NCCopt) foi conduzida com abordagem berço ao portão, desde a extração de matérias-primas até a saída do produto do sistema de produção (laboratorial/prospectivo). Para os sistemas agrícolas de soja e alface, adotou-se abordagem berço ao campo (Hasler *et al.*, 2015), incluindo produção e transporte de insumos, operações agrícolas, aplicação dos corretivos e emissões de campo.

A abordagem berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) não foi aplicada por três motivos: primeiro, o objetivo do estudo é comparar alternativas de corretivo e seus efeitos até a etapa agrícola (produção e aplicação), em que se concentram os principais mecanismos de interesse ambiental para este estudo (insumos agrícolas, emissões diretas do solo e logística de aplicação); segundo, as etapas pós-colheita e de consumo (processamento, embalagem, refrigeração, distribuição, varejo e destinação final) tendem a ser fortemente dependentes de contexto, variando com cadeia de suprimentos, distância a mercados, condições de armazenamento e perdas, o que introduziria elevada variabilidade e reduziria a comparabilidade entre cenários cujo diferencial central está no corretivo; e terceiro, a inclusão dessas fases exigiria dados primários e suposições adicionais que não fazem parte do escopo experimental do presente estudo, aumentando a incerteza do inventário.

Assim, no escopo-base, não foram incluídas as etapas de processamento pós-colheita, embalagem, refrigeração, distribuição, consumo e destinação final dos alimentos, tampouco o fim de vida dos corretivos. Portanto, o estudo não configura uma ACV berço ao túmulo e os resultados devem ser interpretados como representativos até as fronteiras definidas.

#### **4.13 Mudança de uso da terra e categoria *uso da terra***

A modelagem adotada representa sistemas agrícolas já estabelecidos, sem simular explicitamente cenários de desmatamento ou conversão de ecossistemas naturais. Não foram incluídas emissões associadas à mudança de uso da terra (LUC) para soja e alface; dessa forma, potenciais impactos ligados à expansão da fronteira agrícola não são capturados. A categoria de *uso da terra* do método ReCiPe 2016 Midpoint (H) foi calculada, mas tratada apenas como indicador de apoio, pois as diferenças entre cenários decorrem principalmente de variações de produtividade (área por tonelada de produto), já refletidas de forma mais sensível em outras categorias (mudança do clima, eutrofização, uso da água, toxicidades).

#### 4.14 Maturidade tecnológica e escala de análise do NCC

A tecnologia de produção de nanocarbonato de cálcio analisada neste estudo situa-se em nível de maturidade tecnológica entre TRL 4 e TRL 5 (Freeman e Bhowan, 2011), isto é, entre validação em ambiente laboratorial e validação em ambiente representativo, com experimentos realizados em escala laboratorial e com misturas gasosas pós-combustão. O processo de síntese de NCC foi desenvolvido considerando uma mistura de gases com composição volumétrica de 81 % N<sub>2</sub>, 11 % O<sub>2</sub> e 8 % CO<sub>2</sub>, simulando as emissões gasosas da chaminé de uma usina termelétrica a carvão (como a Eletrobras CGTEE, Candiota/RS). Para comparação, o ar seco atmosférico contém aproximadamente 78,08 % de nitrogênio, 20,95 % de oxigênio, 0,93 % de argônio e cerca de 0,04 % de dióxido de carbono, além de pequenas quantidades de outros gases (Wallace 2023); assim, a concentração de CO<sub>2</sub> na mistura simulada é cerca de 7,6 % maior do que no ar sem emissões adicionais.

Essa simplificação da composição do gás de chaminé (sem considerar explicitamente espécies como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e particulados) e a própria escala laboratorial implicam incertezas quanto à extrapolação dos resultados para uma planta industrial. Além disso, o cenário NCCopt representa uma rota de processo otimizada conceitual, construída com base na leitura de *hotspots* do NCCLab e em suposições de melhoria de eficiência energética; sua *performance* ambiental real dependerá de escolhas de projeto ainda não implementadas em escala-piloto ou industrial.

#### 4.15 Simplificações nos cenários agrícolas e no manejo do solo

Os cenários agrícolas de soja e alface foram construídos a partir de práticas de manejo consideradas representativas, com hipóteses de produtividade, doses de fertilizantes, uso de água e frequência de aplicação de corretivos baseadas em literatura e em recomendações técnicas (Embrapa, 2020). Assumiu-se que, exceto pela estratégia de correção da acidez do solo (sem calagem, calcário, NCCLab, NCCopt), as demais práticas de manejo permaneceriam constantes entre os cenários, de modo a isolar o efeito da variável de interesse e assegurar comparabilidade na ACV (ISO, 2006).

A dinâmica de carbono orgânico do solo ( $\Delta$ SOC) e de emissões de N<sub>2</sub>O foi representada de forma simplificada, por meio de fatores médios e cenários exploratórios, não por modelos dinâmicos espaço-temporais. Consequentemente, os resultados relativos a  $\Delta$ SOC e fluxos de

carbono biogênico devem ser interpretados como estimativas de ordem de grandeza, e não como quantificações exatas para áreas específicas.

#### **4.16 Método de avaliação de impacto e categorias não priorizadas**

A avaliação de impactos foi realizada com base no método IPCC 2013 (100 e 20 anos) para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) e no método ReCiPe 2016 Midpoint (H) para as demais categorias. Outros métodos de impacto disponíveis na literatura poderiam produzir resultados numéricos diferentes, sobretudo para categorias como toxicidade e ecotoxicidade. Além disso, embora todas as categorias de ponto médio do ReCiPe 2016 Midpoint (H) tenham sido calculadas, a discussão se concentrou em mudança do clima, toxicidades humanas (carcinogênica e não carcinogênica), ecotoxicidade em água doce, eutrofização em água doce, escassez de recursos fósseis, uso da água e formação de material particulado fino. Categorias como acidificação terrestre, formação de ozônio fotoquímico e uso da terra foram analisadas apenas como apoio, por apresentarem menor sensibilidade relativa entre os cenários estudados e não alterarem as conclusões principais.

#### **4.17 Aspectos espaciais e temporais das emissões**

Finalmente, a modelagem adotada não é espacialmente explícita: fatores médios de emissão e de impacto foram aplicados sem diferenciação por microrregiões, características locais do solo, como pH, condições climáticas e padrões locais de dispersão atmosférica. Da mesma forma, aspectos temporais das emissões (por exemplo: sazonalidade de uso de fertilizantes, tempo de residência do carbono no solo ou variações horárias na formação de material particulado) não foram representados em detalhe. Essas simplificações são compatíveis com o nível de resolução de um estudo de ACV de escopo nacional, mas limitam o uso direto dos resultados para avaliações locais ou para análises regulatórias de qualidade do ar e de água em bacias específicas.

Adicionalmente, a modelagem do CO<sub>2</sub> capturado seguiu uma abordagem do tipo cut-off, ou carga zero, na qual o fluxo de CO<sub>2</sub> entra no sistema de produção do NCC sem incorporar as cargas ambientais do processo industrial que o originou. Dessa forma, os impactos associados à geração de energia e à emissão primária do gás na usina termelétrica permanecem fora das fronteiras da ACV, sendo consideradas apenas as etapas subsequentes de captura, transformação e recuperação do CO<sub>2</sub> na forma de NCC. Essa escolha metodológica é coerente com o objetivo do estudo, que se concentra na avaliação da rota de conversão do CO<sub>2</sub> em produto de valor agregado, e não na repartição de cargas ambientais do sistema emissor original.

#### **4.18 Procedimento de valoração exploratória**

Para efeito de cálculo (Tabela 10) foram considerados dois níveis de preços de referência para créditos de carbono, com base em informações de mercado recentes (Reset, 2024; XP Investimentos, 2023; Sustainable Markets Initiative, 2024; World Bank, 2024): um preço “baixo/brasileiro”, em torno de US\$5 por tCO<sub>2</sub>, e um preço “médio/internacional”, em torno de US\$23 por tCO<sub>2</sub>.

Para efeito de cálculo, podemos usar dois cenários:

- Preço baixo/brasil: US\$5 por tCO<sub>2</sub>/Preço “médio/internacional”: US\$23 por tCO<sub>2</sub>;
- Aplicando aos resultados de captura e armazenamento.

Para fazer a comparação, vamos considerar: CO<sub>2</sub> capturado na biomassa (plantas) que já estimamos para soja e alface em diferentes cenários.

Armazenamento de longo prazo no solo ( $\Delta$ SOC), usando os cenários de armazenamento que montamos.

**Tabela 10** – Faixas de preços de referência para créditos de carbono (US\$ por tCO<sub>2</sub>).

| Tipo de mercado              | Faixa por preço habitual                                                   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Mercado voluntário no Brasil | ≈ US\$4,80 por tCO <sub>2</sub> no 3º tri de 2024 <a href="#">Reset</a>    |
| Outras estimativas no Brasil | US\$10 a US\$12 por tCO <sub>2</sub> <a href="#">XP Investimentos+I</a>    |
| Média global                 | ~ US\$23 por tCO <sub>2</sub> em 2023 <a href="#">systemschangelab.org</a> |
| Faixa ampla global           | de ~ US\$0,46 até ~ US\$167 por tCO <sub>2</sub>                           |

**Fonte:** Autor, com base em Reset (2024), XP Investimentos (2023), Sustainable Markets (2024) e World Bank (2024).

Com base nas faixas de preços apresentadas na Tabela 10, os resultados permitem indicar, em caráter exploratório, a existência de potencial econômico associado ao uso do NCC em estratégias vinculadas a mercados de carbono. Esse potencial relaciona-se, sobretudo, à captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa e a possíveis incrementos de carbono orgânico do solo.

Entretanto, tais benefícios não foram mensurados formalmente nesta tese por meio de análise econômica estruturada, com fluxos de receita, custos ou retorno de investimento. Assim, não é possível afirmar, no presente estudo, se os eventuais ganhos de produtividade e a possível valorização em mercados de carbono seriam suficientes para compensar custos adicionais associados ao uso do NCC. Ainda assim, avanços regulatórios e metodológicos na certificação de carbono no solo poderão, no curto e médio prazo, ampliar a atratividade econômica dessa tecnologia.

---

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Do ponto de vista de processo, a análise de consumo energético indicou que a etapa de secagem em estufa, já descrita na metodologia, se destaca como o principal *hotspot* de demanda de energia térmica na rota laboratorial, superando o consumo associado a outras operações unitárias. Esse resultado antecipa a necessidade de otimização dessa etapa em cenários de escala ampliada, seja por meio da substituição da estufa por tecnologias de secagem mais eficientes, seja pela integração de fontes alternativas de calor de menor intensidade de emissões.

Os resultados indicaram um incremento produtivo estimado de 162,5 % na alface tratada com NCC, em comparação ao tratamento sem correção da acidez do solo, evidenciando o potencial agrônomo do material em condições controladas. Esse aumento expressivo de produtividade, ainda que obtido em escala de casa de vegetação, demonstra o potencial do nanocarbonato como insumo agrícola com elevada reatividade e capacidade de melhorar a disponibilidade de nutrientes em condições de solo ácido.

A partir desses dados, é possível discutir, de forma exploratória, cenários de produtividade em termos de  $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , considerando diferentes regiões e épocas de cultivo. Os resultados também constituem a base para a estimativa indireta da captura de  $\text{CO}_2$  biogênico via incremento de biomassa, bem como para a discussão futura de créditos de carbono associados ao aumento de produtividade e ao potencial de sequestro de carbono em sistemas agrícolas que utilizem NCC como corretivo. Esses ensaios, portanto, cumprem um papel de prova de conceito, permitindo integrar os resultados agrônômicos preliminares às análises de ACV com fronteira ampliada, do tipo berço ao campo (*cradle-to-field*) sem substituir a necessidade de validações agrônômicas adicionais em condições de campo.

Para facilitar a leitura, os resultados são apresentados na seguinte ordem: (i) desempenho ambiental da produção de NCC (NCClab e NCCopt) por unidade de massa; (ii) resultados por hectare nos cenários agrícolas; e (iii) resultados por tonelada de produto, destacando o efeito da penalidade de produtividade em condição de solos ácidos. Em cada etapa, a interpretação é apoiada pela decomposição por processos e categorias.

## **5.1 Resultados da ACV da produção de NCC (rota laboratorial)**

Esta ACV teve como objetivo quantificar os impactos ambientais da rota laboratorial de produção de NCC a partir de CO<sub>2</sub> de emissões industriais e identificar oportunidades de otimização do processo, com foco em mudança climática.

## **5.2 Objetivo e escopo (síntese)**

A modelagem foi realizada no openLCA, em conformidade com as normas ISO 14040:2006/14044:2009. A unidade funcional adotada foi 1,00kg de NCC produzido. As fronteiras do sistema consideram o escopo *cradle-to-gate*, abrangendo a entrada do CO<sub>2</sub> no sistema de borbulhamento e as etapas de síntese e condicionamento até a obtenção do NCC (produto na saída do processo). A avaliação de impacto foi conduzida pelo método IPCC 2013, reportando-se GWP e GTP nos horizontes de 20 anos e 100 anos.

## **5.3 Inventário: principais fluxos e premissas**

O inventário foi estruturado por unidade funcional (1,00 kg de NCC), consolidando os principais fluxos de matéria e energia associados à rota laboratorial. Os fluxos dominantes incluem água de processo, hidróxido de cálcio, CO<sub>2</sub> alimentado ou capturado e eletricidade para operação dos equipamentos utilizados no borbulhamento, agitação, condicionamento e secagem.

## **5.4 Avaliação de impacto, mudança climática: GWP e GTP para o NCC laboratorial**

A primeira etapa de aplicação da ACV concentrou-se na rota laboratorial de produção do NCC, com fronteira do tipo berço ao portão (*cradle-to-gate*), englobando insumos químicos, consumo de água, eletricidade e energia térmica, além das emissões diretas associadas ao processo. A análise foi conduzida no *software* openLCA, Método LCIA IPCC2013, utilizando fatores de caracterização para potencial de aquecimento global (GWP) e potencial de mudança de temperatura global (GTP).

O GWP é uma métrica que mede o impacto relativo de um GEE em relação ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), considerando um período específico (normalmente, 20, 100 ou 500 anos). O GWP do CO<sub>2</sub> é definido como uma medida de referência para outros GEE, de modo que 1 kg de CO<sub>2</sub>e. equivale a 1 kg de CO<sub>2</sub>, e os valores de GWP de outros gases são determinados com base na comparação com essa referência.

O GTP é uma métrica que avalia o impacto de um GEE em termos do aumento da temperatura média global ao longo de um determinado horizonte temporal. O GTP difere do GWP porque foca diretamente na mudança de temperatura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

Tanto no GWP como no GTP, o CO<sub>2</sub> é considerado uma referência de GEE, e os demais gases são avaliados com base em seu potencial de aumentar a temperatura em comparação com o CO<sub>2</sub>. A Tabela 11 apresenta os resultados consolidados para 1 kg de NCC produzido.

**Tabela 11** – Categoria de Impacto GTP e GWP do NCC.

| Categoria de impacto                  | Unidade<br>Referência | Resultado<br>kg | Resultado<br>g |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| <b>Mudanças Climáticas – GTP 100a</b> | kg CO <sub>2</sub> e  | 0,016530        | 16,530         |
| <b>Mudanças Climáticas – GTP 20a</b>  | kg CO <sub>2</sub> e  | 0,023266        | 23,266         |
| <b>Mudanças Climáticas – GWP 100a</b> | kg CO <sub>2</sub> e  | 0,019182        | 19,182         |
| <b>Mudanças Climáticas – GWP 20a</b>  | kg CO <sub>2</sub> e  | 0,024934        | 24,934         |

**Fonte:** Resultados da ACV do NCC fornecidos pelo openLCA.

Comparando os horizontes temporais, observa-se que tanto o GWP20 quanto o GTP20 são superiores aos correspondentes em 100 anos, evidenciando a maior relevância das emissões de curto prazo para o aquecimento global e para o aumento da temperatura média global. Esse comportamento é consistente com a literatura de mudanças climáticas, que aponta maior sensibilidade dos indicadores de 20 anos a gases de vida média mais curta ou a perfis de emissão concentrados no início do ciclo.

A decomposição dos resultados por processo evidencia que os principais contribuintes positivos para o GWP e o GTP estão associados ao consumo de eletricidade em diferentes etapas do processo (agitação, controle de temperatura, centrifugação, filtração a vácuo e secagem), o que é coerente com diretrizes e análises de ACV para tecnologias de CCU, nas quais a demanda energética frequentemente domina o perfil de impactos (Müller *et al.*, 2020).

Em contraste, a fixação de CO<sub>2</sub> na forma de CaCO<sub>3</sub> precipitado pode aparecer como contribuição negativa (crédito de remoção/armazenamento), parcialmente compensando

emissões associadas aos insumos e à energia, desde que o balanço de carbono e as regras de contabilização sejam explicitadas (Ostovari *et al.*, 2020).

De forma geral, os resultados mostram que, para a escala laboratorial avaliada, a pegada de carbono por quilograma de NCC varia de 16,53 g CO<sub>2</sub>e a 24,93 g CO<sub>2</sub>e, dependendo da métrica e do horizonte temporal considerados, mas ainda dominada pelas exigências energéticas do processo experimental — em especial, pela secagem prolongada em estufa.

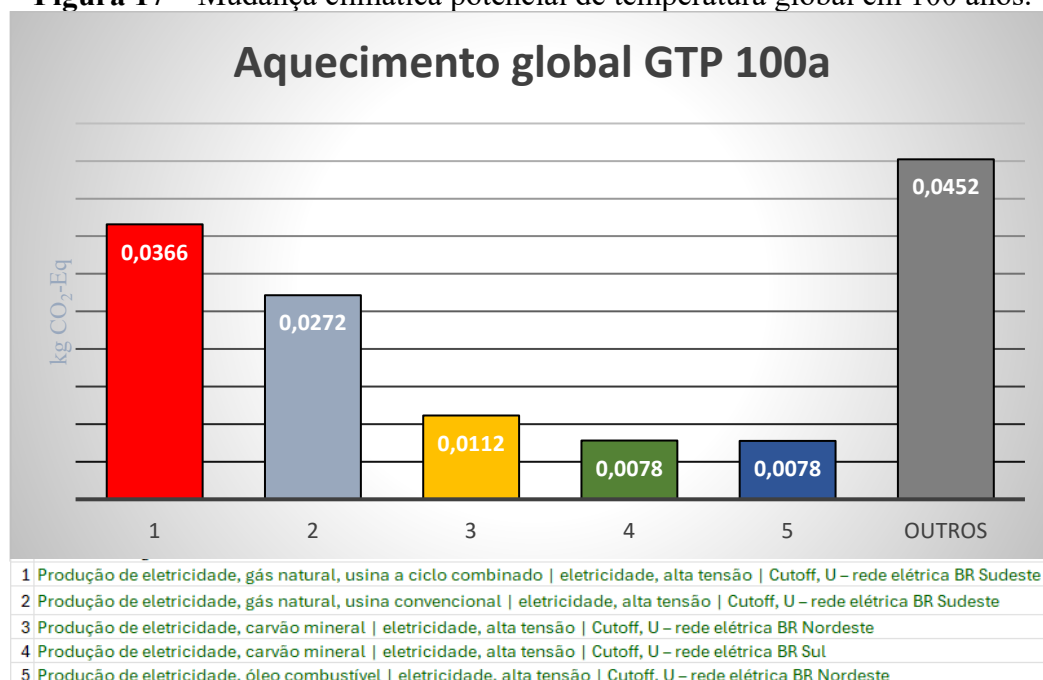
O resultado obtido para o GTP em 100 anos foi de 16,53 g CO<sub>2</sub>e, enquanto para 20 anos é de 23,26 g CO<sub>2</sub>e. Isso indica que o potencial de mudança de temperatura global é maior quando considerado um horizonte de 20 anos, em comparação com um período de 100 anos, destacando o impacto mais significativo das emissões no curto prazo.

O GWP100 foi de 19,18 g CO<sub>2</sub>e e o GWP20, de 24,93 g CO<sub>2</sub>e, indicando que o horizonte de 20 anos atribui maior peso aos efeitos climáticos de curto prazo, resultando em valor agregado mais elevado do indicador.

A diferença entre os resultados de GTP e GWP deve-se às abordagens distintas na avaliação do impacto das emissões de gases de efeito estufa. O GWP mede o potencial de aquecimento com base na absorção de radiação, enquanto o GTP avalia o impacto na temperatura média global.

Os resultados mostram que, independentemente do método (GTP ou GWP), as emissões de carbono são relativamente baixas para o NCC, com valores variando de 16,53 g de CO<sub>2</sub>e para o GTP em 100 anos e 23,26 g CO<sub>2</sub>e. para GTP em 20 anos. Os gráficos gerados com os cálculos das quatro categorias de impacto estão representados nas Figuras 17, 18, 19 e 20:

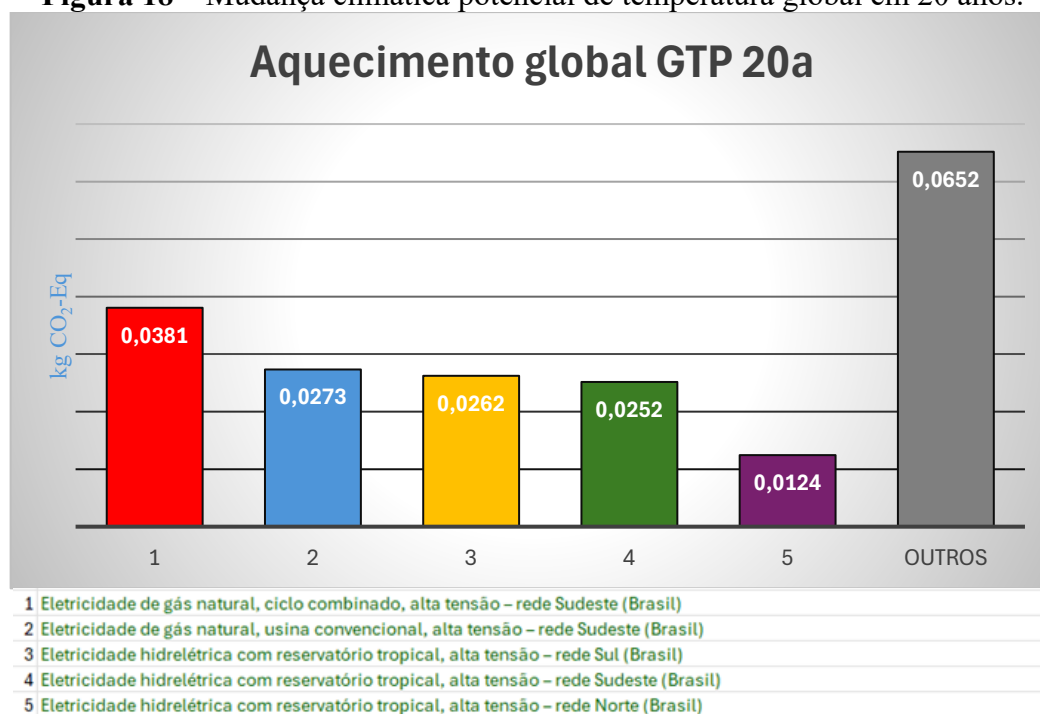
**Figura 17** – Mudança climática potencial de temperatura global em 100 anos.



**Fonte:** Resultados da ACV do NCC obtidos pelo openLCA (método IPCC 2013 GTP 100a).

A Figura 17 apresenta os cinco principais contribuintes para o impacto climático em um horizonte de 100 anos (GTP 100a), expressos em kg CO<sub>2</sub>e, com base nos resultados obtidos no openLCA. As barras representam processos específicos da cadeia de produção do NCC, destacando, principalmente, o consumo de eletricidade e calor em diferentes etapas do processo (agitação, controle de temperatura, secagem, entre outras). O item “Outros” agrupa processos secundários que, individualmente, têm contribuição inferior ao limite de corte adotado, mas, somados, representam parcela não desprezível do resultado total.

**Figura 18** – Mudança climática potencial de temperatura global em 20 anos.



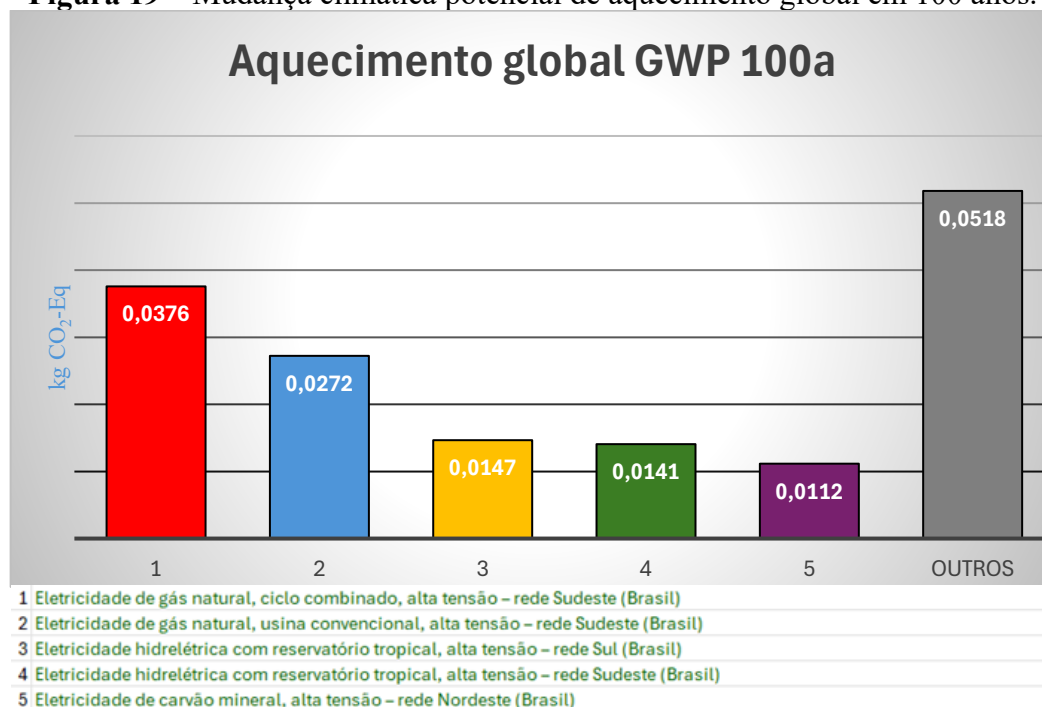
**Fonte:** Resultados da ACV do NCC obtidos pelo openLCA (método IPCC 2013 GTP 20a).

No gráfico referente à categoria de impacto climático GTP 20 anos (Figura 18), os cinco principais contribuintes são processos associados ao consumo de eletricidade e calor do sistema, e o próprio fluxo de NCC aparece apenas como o quinto termo, com contribuição relativamente pequena ( $\approx 0,012$  kg CO<sub>2</sub>e). Diferentemente do que se observa no GTP 100 anos (Figura 19), a remoção de CO<sub>2</sub> associada à formação do NCC não se destaca como contribuição líquida negativa; no horizonte de 20 anos, o efeito de curto prazo das emissões ligadas ao consumo de

energia supera o crédito de fixação de carbono, resultando em uma contribuição positiva, ainda que baixa, do NCC para o indicador de aquecimento global de curto prazo.

A Figura 18 mostra os cinco principais contribuintes para o Potencial de Aquecimento Global em 100 anos (GWP 100a). Novamente, os processos ligados ao fornecimento de eletricidade e calor dominam o resultado, enquanto as demais etapas do processo de síntese do NCC aparecem com contribuições menores. A ordem de grandeza das barras é semelhante à observada em GTP 100a, reforçando que, para o horizonte de 100 anos, o perfil de contribuição relativa dos processos é estável entre os dois indicadores.

**Figura 19** – Mudança climática potencial de aquecimento global em 100 anos.



**Fonte:** Resultados da ACV do NCC obtidos pelo openLCA (método IPCC 2013 GWP 100a).

Na Figura 20, referente ao GWP 20 anos (GWP 20a), observa-se um comportamento análogo ao do GTP 20a: as contribuições de curto prazo associadas ao uso de energia tornam-se relativamente mais relevantes, e todos os processos listados apresentam contribuições positivas em termos de kg CO<sub>2</sub>e. As diferenças entre GWP 20a e GWP 100a concentram-se na intensidade relativa das barras, não havendo inversão de sinal; a contribuição associada ao NCC permanece pequena, quando comparada aos processos energéticos, indicando que a etapa de síntese, em escala laboratorial, é dominada pelo perfil de consumo de eletricidade e calor e não pelo crédito de CO<sub>2</sub> incorporado ao produto.

**Figura 20** – Mudança climática potencial de aquecimento global em 20 anos.

**Fonte:** Resultados da ACV do NCC obtidos pelo openLCA. (método IPCC 2013 GWP 20a).

Outros resultados podem ser selecionados e analisados, como o do dióxido de carbono de origem fóssil com emissão para o ar localizada (quando a posição geográfica é definida), referente à liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera proveniente da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. A designação “não especificada” indica que a fonte exata da emissão de CO<sub>2</sub> não é detalhada, apenas que a origem do carbono é fóssil. Paralelamente aos resultados das categorias de impacto do produto, é possível analisar os fluxos referentes aos componentes de maior contribuição do inventário.

O termo *fóssil* refere-se ao carbono que foi armazenado na Terra por milhões de anos, presente em combustíveis fósseis. Quando esses combustíveis são queimados para a produção de energia, o carbono armazenado é liberado na forma de CO<sub>2</sub> (Yoro, 2020).

Em relação às emissões de CO<sub>2</sub> fóssil, essa é uma das principais causas do aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, levando às mudanças climáticas. Esse processo de liberação de carbono, que estava anteriormente sequestrado, contribui significativamente para o aquecimento global.

A designação “emissão para o ar/não especificada” sugere que, embora o CO<sub>2</sub> emitido seja contabilizado, a fonte precisa (como um tipo específico de combustível fóssil ou uma instalação específica) não é identificada. Isso pode ocorrer em inventários de emissões quando

se busca contabilizar todas as emissões de CO<sub>2</sub> de fontes fósseis sem discriminar cada fonte específica.

Resumidamente, o termo descreve a contribuição para a poluição atmosférica pelo CO<sub>2</sub> proveniente de combustíveis fósseis, sem especificar a fonte exata dessa emissão. O termo emissão de CO<sub>2</sub> fóssil em local não específico também foi verificado por outros autores como estudo da avaliação da ligação entre emissões de CO<sub>2</sub> e indicadores socioeconômicos (Nimerenco *et al.*, 2024).

## 5.5 Interpretação: hotspots e diretrizes para otimização

A análise de contribuição por processo confirma a etapa de secagem como o principal *hotspot* energético e climático da rota laboratorial, seguida pelo consumo de eletricidade em equipamentos auxiliares. Operações típicas de bancada, com baixa eficiência energética e tempos de residência elevados, acabam amplificando o impacto por unidade de produto, ainda que a massa absoluta de NCC produzida seja relativamente pequena.

Com base nessa primeira ACV, foi proposta uma rota conceitual de produção otimizada de NCC, que mantém a função de produto (fornecer 1 kg de NCC com propriedades semelhantes de área específica e granulometria), mas introduz modificações em três frentes principais:

- Substituição de fontes de calor com maior intensidade de emissões de gases de efeito estufa por unidade de energia por alternativas de menor intensidade de carbono (por exemplo: eletrificação com matriz elétrica de menor pegada de carbono, uso de biomassa ou aproveitamento de calor residual);
- Redução de tempo e ou temperatura nas etapas de secagem, associada a equipamentos mais eficientes em termos de transferência de calor;
- Melhoria do rendimento global do processo, com redução de perdas de sólido ao longo das etapas de separação e manipulação do produto.

Os resultados comparativos indicam que a rota otimizada é capaz de reduzir os impactos ambientais por kg de NCC em ordem de grandeza entre 97 % e 98 % em relação à rota laboratorial (Tabela 12 e Figura 21), dependendo da categoria de impacto considerada. Apesar dessa redução expressiva, o NCC otimizado ainda tende a apresentar impactos superiores aos

do calcário comercial em diversas categorias — especialmente em indicadores relacionados ao consumo de água e à ecotoxicidade —, devido à maior complexidade do processo industrial de precipitação em comparação à simples moagem do calcário.

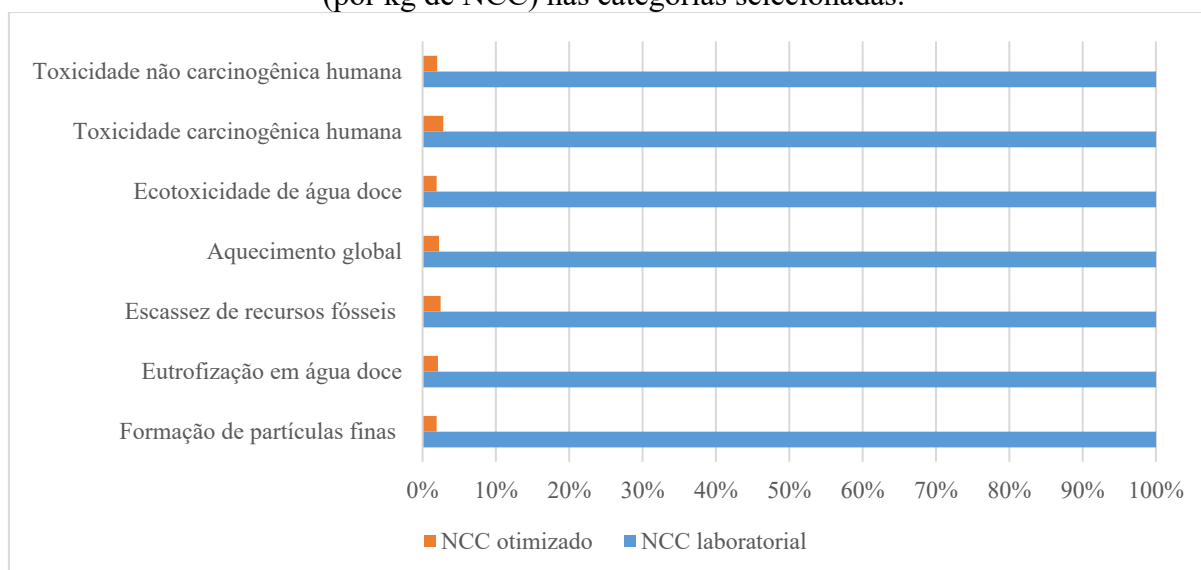
**Tabela 12** – Comparação dos impactos ambientais do NCCLab e NCCOpt (por kg de NCC).

| Categorias de impactos              | Unidade                 | NCCLab    | NCCOpt  |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------|---------|
| Formação de partículas finas        | kg PM 2,5 eq            | 0,25246   | 0,00481 |
| Eutrofização em água doce           | kg P eq                 | 0,01474   | 0,00031 |
| Escassez de recursos fósseis        | kg oil eq               | 45,7578   | 1,12287 |
| Aquecimento global                  | kg CO <sub>2</sub> e    | 194,51665 | 4,33312 |
| Toxicidade carcinogênica humana     | kg 1,4-DCB <sup>3</sup> | 5,63933   | 0,15864 |
| Ecotoxicidade de água doce          | kg 1,4-DCB              | 5,36913   | 0,10241 |
| Toxicidade não carcinogênica humana | kg 1,4-DCB              | 72,09319  | 1,43721 |

**Fonte:** Autor, com base no openLCA (2026).

Por outro lado, quando se considera a integração do NCC aos sistemas agrícolas de soja e alface, a rota otimizada torna-se o cenário mais realista e ambientalmente aceitável para comparação com o calcário. A rota laboratorial passa a ser interpretada como um cenário de referência experimental, útil para caracterização de material e calibração de inventários, mas inviável como base para análise de implantação em escala.

**Figura 21** – Redução percentual dos impactos ambientais do NCCOpt em relação ao NCCLab (por kg de NCC) nas categorias selecionadas.



<sup>3</sup>DCB = 1,4-diclorobenzeno (1,4-DCB), substância de referência para expressar equivalentes em categorias de toxicidade e ecotoxicidade.

**Fonte:** Elaboração do autor, com base em resultados do openLCA (2025).

## **5.6 Resultados da ACV berço ao campo: uso do NCC em sistemas agrícolas (alface e soja)**

### **5.6.1 Objetivo e escopo (alface e soja)**

Define-se a unidade funcional (UF) como 1 kg de produto, bem como os cenários C1, C2, C3 e C4, no escopo berço ao campo. A escolha de 1 kg como UF para o NCC visa assegurar comparabilidade com inventários de bancos de dados (por exemplo: processos de carbonato e calcário) e com estudos de ACV em escala industrial, além de permitir avaliação direta por unidade de insumo aplicado.

### **5.6.2 Análise do inventário: principais fluxos e premissas (alface e soja)**

Para a cultura da alface (*Lactuca sativa*), a ACV em abordagem berço ao campo (*cradle to field*) considerou um sistema de produção intensivo, com irrigação, fertilização e uso de defensivos, típico de horticultura comercial, com a correção da acidez do solo conforme os quatro cenários definidos na Metodologia.

A ACV da soja em abordagem berço ao campo considerou a produção de grãos em sistema mecanizado. Foram avaliados os mesmos quatro cenários de manejo da acidez do solo da alface:

- C1: Sem calagem (solo ácido, sem aplicação de corretivo);
- C2: Calcário agrícola;
- C3: NCClab (NCC em rota laboratorial);
- C4: NCCopt (NCC em rota otimizada).

Foram avaliadas duas unidades funcionais:

- 1 ha cultivado, para análise espacial dos fluxos;
- 1 kg de grão de soja, para comparação de eficiência ambiental entre cenários;
- A unidade funcional principal adotada foi de 1 kg de alface fresca, com 1 ha cultivado utilizado para análise de sensibilidade.

### 5.6.3 Análise dos resultados por hectare cultivado da alface

Por hectare, o cenário C1 (sem calagem) apresenta menores contribuições associadas ao corretivo, por não haver aplicação de insumo para correção da acidez. No entanto, em sistemas de produção de alface, o uso da água para irrigação e o uso de fertilizantes e defensivos têm peso muito maior que o corretivo em várias categorias de impacto.

Nos cenários com corretivo (C2 - C4), observa-se o aumento dos impactos por hectare em categorias vinculadas ao ciclo de vida do insumo (GWP, recursos fósseis, PM<sub>2.5</sub><sup>4</sup>, toxicidades). Em C3, com NCClab, esse incremento é particularmente alto; em C4, o perfil é intermediário, porém ainda mais elevado que o do calcário em C2.

### 5.6.4 Análise dos resultados por hectare cultivado da soja

Quando os resultados são expressos por hectare cultivado, o cenário C1, sem calagem apresenta, em geral, valores ligeiramente menores de impacto nas categorias diretamente associadas ao corretivo (mudança do clima, escassez de recursos fósseis, formação de material particulado, toxicidades), simplesmente porque não há produção, transporte e aplicação de corretivo.

Nos cenários C2 - C4, observa-se um aumento progressivo dos impactos por hectare nas categorias mais sensíveis ao corretivo:

- Em C2 com calcário, o acréscimo é moderado, refletindo a pegada relativamente baixa por kg de calcário;
- Em C3: NCClab, o aumento é muito mais pronunciado, devido ao perfil ambientalmente oneroso da rota laboratorial;
- Em C4: NCCopt, os impactos por hectare situam-se em posição intermediária entre C2 e C3, porém ainda superiores ao cenário com calcário em diversas categorias.

Em todas as situações, as contribuições associadas a fertilizantes, uso de diesel e emissões de N<sub>2</sub>O do solo permanecem dominantes nas categorias de mudança do clima,

---

<sup>4</sup>PM<sub>2.5</sub> refere-se ao material particulado fino com diâmetro aerodinâmico  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ . No contexto da ACV, “formação de material particulado fino” é geralmente reportada em kg PM<sub>2.5</sub> eq e representa o potencial de geração de partículas finas com efeitos adversos à saúde humana.

escassez de recursos fósseis e, em menor grau, formação de material particulado, independentemente do corretivo utilizado.

### **5.6.5 Resultados por tonelada de alface fresca**

Para a alface, adotou-se o pH 6,5 como condição mais favorável ao desenvolvimento da cultura, por estar inserido na faixa agronomicamente adequada de pH 6,0 a 7,0. Em contraste, o pH 5,5 representa uma condição de maior acidez, potencialmente associada à menor disponibilidade de nutrientes e à redução de rendimento. No presente estudo, essa diferença foi representada por cenários contrastantes de produtividade e captura de CO<sub>2</sub> biogênico.

Para 1 t de alface, assumiu-se uma penalidade de produtividade (Tabela 13) da ordem de 20 % teórico no cenário C1, correspondente à condição de solo mais ácido, representada por pH 5,5, em relação aos cenários C2 a C4, representativos de condição mais favorável ao desenvolvimento da cultura, com pH 6,5. Essa penalidade implica:

- Maior área irrigada por tonelada de alface;
- Maior consumo de água, fertilizantes e defensivos por unidade de produto;
- Maior contribuição relativa de energia usada na irrigação e na fertirrigação.

Assim, quando os resultados são expressos por tonelada:

- O cenário C1 – sem calagem deixa de ser claramente vantajoso, pois a redução de impactos associada à ausência de corretivo é compensada pelo aumento da intensidade de uso de água e insumos por t de produto;
- O cenário C2 – calcário melhora a eficiência de uso de recursos (água, fertilizantes) por t de alface, embora introduza a pegada do calcário no balanço;
- O cenário C3 – NCClab sofre forte penalização em praticamente todas as categorias, devido ao alto impacto por kg do NCClab;
- O cenário C4 – NCCopt apresenta desempenho intermediário, com impactos adicionais associados ao NCCopt por t de alface, porém bem menores que em C3.

**Tabela 13** – CO<sub>2</sub> biogênico capturado na produção de alface.

| Cultura | Valor de pH | Índice de colheita | Massa fresca (t ha <sup>-1</sup> ) | Massa seca (%) | Biomassa seca (t por ha <sup>-1</sup> ) | Carbono biogênico (t C ha <sup>-1</sup> ) | CO <sub>2</sub> biogênico capturado (tCO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> ) |
|---------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Alface  | 5,5         | Baixa              | 24                                 | 5,00           | 1,20                                    | 0,54                                      | 1,98                                                                     |
| Alface  | 5,5         | Média              | 24                                 | 6,00           | 1,44                                    | 0,648                                     | 2,376                                                                    |
| Alface  | 5,5         | Alta               | 24                                 | 7,00           | 1,68                                    | 0,756                                     | 2,772                                                                    |
| Alface  | 6,5         | Baixa              | 30                                 | 5,00           | 1,50                                    | 0,675                                     | 2,475                                                                    |
| Alface  | 6,5         | Média              | 30                                 | 6,00           | 1,80                                    | 0,81                                      | 2,97                                                                     |
| Alface  | 6,5         | Alta               | 30                                 | 7,00           | 2,10                                    | 0,945                                     | 3,465                                                                    |

**Fonte:** Autor, com base em dados experimentais do projeto Agricarbono e em fatores de conversão de biomassa em carbono/CO<sub>2</sub> (IPCC, 2006; Embrapa Hortaliças, 2024).

### 5.6.6 Resultados por tonelada de grão de soja

Para a soja, adotou-se o pH 6,5 como condição mais favorável ao desenvolvimento da cultura, por se situar na faixa de maior eficiência agrônômica, geralmente entre pH 6,0 e 6,5. O pH 5,5 foi considerado representativo de uma condição mais ácida, com potencial limitação à nodulação, à fixação biológica de nitrogênio e ao aproveitamento de nutrientes. Assim, a comparação entre esses níveis permitiu representar o efeito da acidez do solo sobre o rendimento e os resultados ambientais da cultura.

Quando os resultados são apresentados por tonelada, trata-se apenas de reescalonamento linear do inventário originalmente expresso por 1 kg do produto no banco de dados (multiplicação por 1.000), sem alterar relações internas do modelo.

Ao se considerar a unidade funcional 1 t de grão de soja, o quadro se altera de forma importante. Devido ao valor de pH subótimo no cenário C1, foi considerada uma penalidade (Tabela 14) de produtividade da ordem de 25 % teórico em relação aos cenários com valor de pH corrigido (C2 - C4). Isso implica:

- Maior área necessária para produzir 1 t de grão;
- Maior consumo de fertilizantes, diesel e demais insumos por tonelada de produto;
- Maior contribuição relativa de emissões de N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> de queima de combustível.

**Tabela 14** – CO<sub>2</sub> biogênico capturado na produção de soja.

| Cult<br>ura | Valor de<br>pH | Índice de<br>colheita | Biomassa seca<br>total (t ha <sup>-1</sup> ) | Grão MS<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | Carbono<br>biogênico<br>(t C ha <sup>-1</sup> ) | CO <sub>2</sub> biogênico<br>capturado<br>(t CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> ) |
|-------------|----------------|-----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Soja        | 5,5            | Baixa                 | 5,836                                        | 2,284                            | 2,626                                           | 9,63                                                                            |
| Soja        | 5,5            | Média                 | 5,481                                        | 2,284                            | 2,466                                           | 9,044                                                                           |
| Soja        | 5,5            | Alta                  | 5,19                                         | 2,284                            | 2,336                                           | 8,564                                                                           |
| Soja        | 6,5            | Baixa                 | 7,782                                        | 3,045                            | 3,502                                           | 12,84                                                                           |
| Soja        | 6,5            | Média                 | 7,308                                        | 3,045                            | 3,289                                           | 12,058                                                                          |
| Soja        | 6,5            | Alta                  | 6,92                                         | 3,045                            | 3,114                                           | 11,419                                                                          |

**Fonte:** Autor, com base em dados experimentais do projeto Agricarbono e em fatores de conversão de biomassa em carbono e CO<sub>2</sub> (IPCC, 2006; Embrapa, 2020).

Como resultado, o cenário C1, sem calagem, deixa de ser ambientalmente vantajoso: mesmo sem impactos associados ao corretivo, a queda de produtividade aumenta os impactos por tonelada de soja em várias categorias, aproximando-os ou até superando os valores obtidos em C2.

No cenário C2, com calcário, a elevação do valor de pH para a faixa ideal resulta em produtividade de referência, reduzindo a área necessária por tonelada e tornando o sistema mais eficiente em uso de insumos. Assim:

- O calcário passa a responder por uma fração relevante, mas não dominante, do GWP e das categorias associadas à energia (fóssil, PM<sub>2.5</sub>);
- Fertilizantes nitrogenados e diesel continuam como os principais contribuintes para o aquecimento global e a formação de material particulado.

No cenário C3 com NCCLab, a combinação de produtividade equivalente à de C2 com um corretivo de altíssimo impacto por kg.

Este resultado faz com que a participação do corretivo no inventário cresça de forma desproporcional. Em categorias como toxicidade humana carcinogênica e não carcinogênica, ecotoxicidade em água doce e escassez de recursos fósseis, o NCCLab passa a ser responsável por uma parcela muito significativa dos impactos totais por tonelada de soja. Esse comportamento torna o cenário C3 ambientalmente inviável do ponto de vista de aplicação em larga escala, sendo mais adequado tratá-lo como cenário de referência experimental.

No cenário C4 com NCCopt, os impactos associados ao corretivo são drasticamente reduzidos em relação a C3, mas ainda superiores aos do calcário em diversas categorias. Em termos qualitativos:

- O GWP por t de soja em C4 é maior que em C2, mas muito menor que em C3; toxicidades humanas e eco toxicidade em água doce também se situam entre os valores de C2 e C3;
- O efeito relativo do corretivo permanece importante, mas fertilizantes, diesel e emissões de solo continuam dominando o inventário.

### 5.6.7 Principais componentes e *hotspots* para alface

Na alface, a análise de componentes evidencia um padrão parcialmente distinto do observado na soja:

- Uso da água: é a categoria dominante em todos os cenários, dada a forte dependência de irrigação. A penalidade de produtividade em C1 amplifica a contribuição da água por t de produto. A correção da acidez em C2-C4 melhora a eficiência hídrica por tonelada, apesar de adicionar os impactos do corretivo;
- Mudança do clima: é influenciada, principalmente, pelo consumo de energia para irrigação, pela produção de fertilizantes e defensivos e, em menor escala, pelo corretivo. Em C3, a pegada do NCClab passa a contribuir de forma relevante para o GWP;
- Ecotoxicidade em água doce e toxicidade humana: estão fortemente associadas a pesticidas e à produção de fertilizantes, que mantêm peso significativo em todos os cenários. O uso do NCClab em C3 acrescenta um componente adicional de toxicidade e ecotoxicidade via rota de síntese; o NCCopt em C4 reduz esse efeito, mas ainda está acima do calcário de C2.
- Escassez de recursos fósseis e formação de PM<sub>2.5</sub>: refletem sobretudo a energia usada em irrigação e a produção de insumos; o padrão é semelhante ao observado na soja, com agravamento em C3 e resultados intermediários em C4.

Considerações para a alface:

- O corretivo é importante, mas o sistema é dominado por água, energia de irrigação e insumos;
- A diferença entre calcário e NCC (C2 vs C4) é relevante, mas não redefine sozinha a hierarquia de *hotspots*;
- O NCCLab em C3 leva a um aumento desproporcional das categorias relacionadas a toxicidade e ecotoxicidade, reforçando sua inadequação para aplicação em escala agrícola.

#### 5.6.8 Principais componentes e *hotspots* para soja

- Mudança do clima: dominada por emissões de N<sub>2</sub>O do solo e CO<sub>2</sub> de combustíveis; o corretivo contribui de forma mais visível em C2-C4, principalmente via CO<sub>2</sub> da reação de carbonatos (calcário, NCC) e energia embutida no insumo;
- Escassez de recursos fósseis: fortemente associada ao uso de diesel e à energia para produção de fertilizantes; o NCCLab adiciona um incremento expressivo via rota de síntese intensiva em energia;
- Formação de material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>): relacionada à queima de combustíveis fósseis na agricultura e na produção de insumos; o padrão segue o de combustíveis, com aumento adicional em C3, devido à alta intensidade energética da rota laboratorial;
- Toxicidade humana carcinogênica/não carcinogênica e ecotoxicidade em água doce: são as categorias em que a diferença entre as rotas de corretivo é mais acentuada. O NCCLab apresenta valores muito elevados por kg, o que se reflete em grande contribuição em C3; o NCCopt reduz substancialmente esse efeito, mas ainda não atinge o desempenho do calcário.

Em todos os cenários, o uso de calcário ou NCC não altera o fato de que a soja continua sendo um sistema em que fertilizantes, energia e (potencialmente) mudança de uso da terra são elementos estruturantes do perfil ambiental. A contribuição do corretivo é relevante e deve ser considerada, mas não redefine sozinha a hierarquia de *hotspots*.

## 5.7 Avaliação de impacto ambiental (alface e soja)

### 5.7.1 Avaliação de impacto na alface: mudança climática

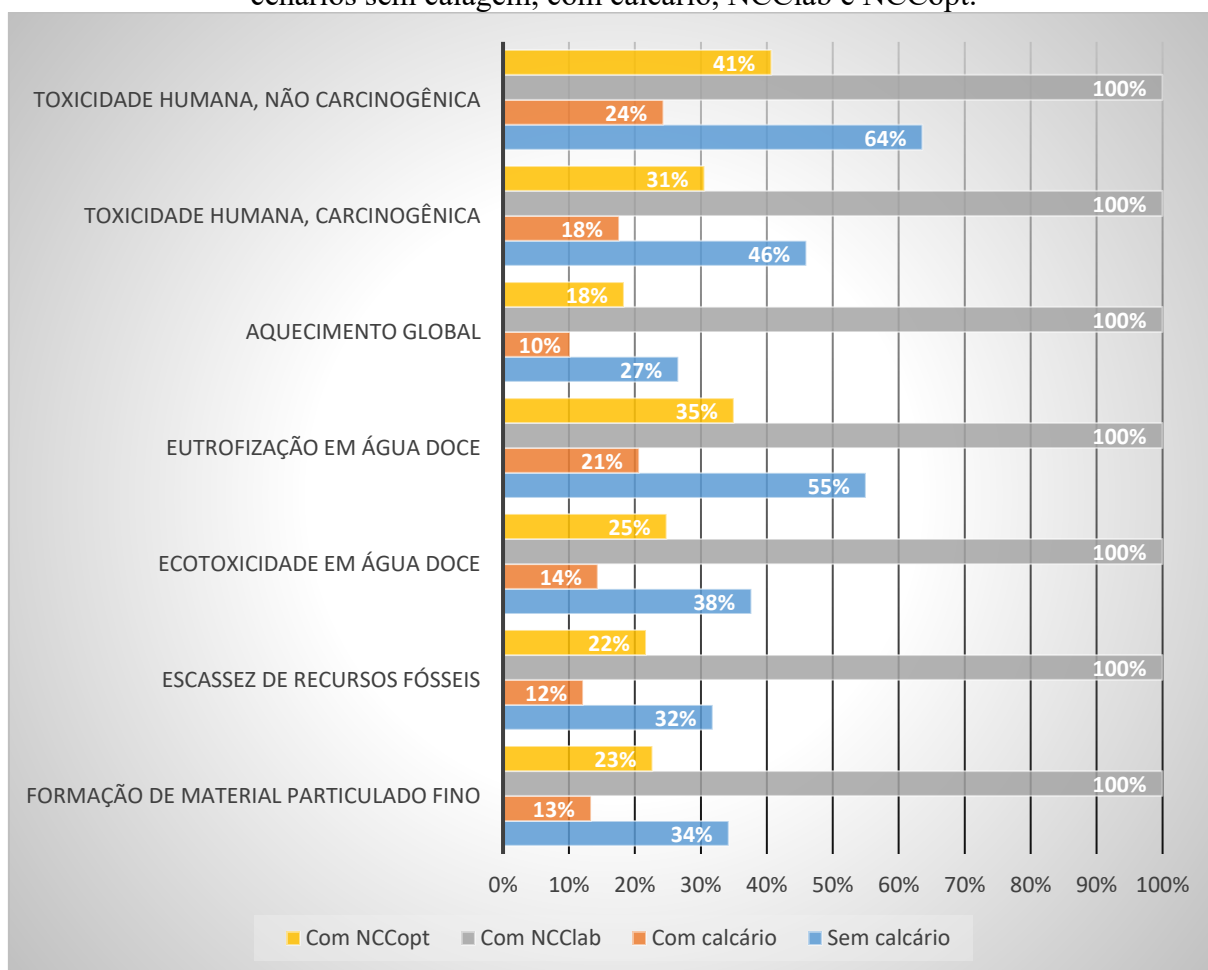
Para a produção de 1 kg de alface, os resultados de Aquecimento Global (kg CO<sub>2</sub>e) mostraram diferenças marcantes entre os quatro cenários avaliados. O cenário com NCCLab apresentou o maior impacto, com 1,634630 kg CO<sub>2</sub>e (Tabela 15), valor aproximadamente 9,9 vezes superior ao cenário com calcário (0,165810 kg CO<sub>2</sub>e), evidenciando o caráter ainda intensivo em energia e insumos da rota laboratorial de síntese do NCC. O cenário com NCCopt reduziu substancialmente esse impacto, para 0,299540 kg CO<sub>2</sub>e, porém, ainda permaneceu cerca de 80 % acima (Figura 22) do valor observado para o calcário convencional.

**Tabela 15** – Impactos ambientais da produção de alface por categoria e cenário de manejo da acidez do solo (sem calcário, com calcário, NCCLab e NCCopt).

| Categoria de impacto                  | Unidade              | Sem calcário | Com calcário | Com NCCLab | Com NCCopt |
|---------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Formação de material particulado fino | kg PM 2,5 eq         | 0,000770     | 0,000300     | 0,002250   | 0,000510   |
| Escassez de recursos fósseis          | kg óleo eq           | 0,127230     | 0,048590     | 0,400100   | 0,086770   |
| Ecotoxicidade em água doce            | kg 1,4-DCB eq        | 0,018520     | 0,007070     | 0,049180   | 0,012200   |
| Eutrofização em água doce             | kg P eq              | 0,000088     | 0,000033     | 0,000160   | 0,000056   |
| Aquecimento global                    | kg CO <sub>2</sub> e | 0,434070     | 0,165810     | 1,634630   | 0,299540   |
| Toxicidade humana, carcinogênica      | kg 1,4-DCB eq        | 0,025480     | 0,009740     | 0,055390   | 0,016920   |
| Toxicidade humana, não carcinogênica  | kg 1,4-DCB eq        | 0,531680     | 0,203190     | 0,836090   | 0,340080   |

**Fonte:** Autor/openLCA, método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

**Figura 22** – Comparação percentual dos impactos ambientais da produção de alface entre os cenários sem calagem, com calcário, NCClab e NCCOpt.



**Fonte:** Autor/openLCA, método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

### 5.7.2 Avaliação de impacto na soja: mudança climática

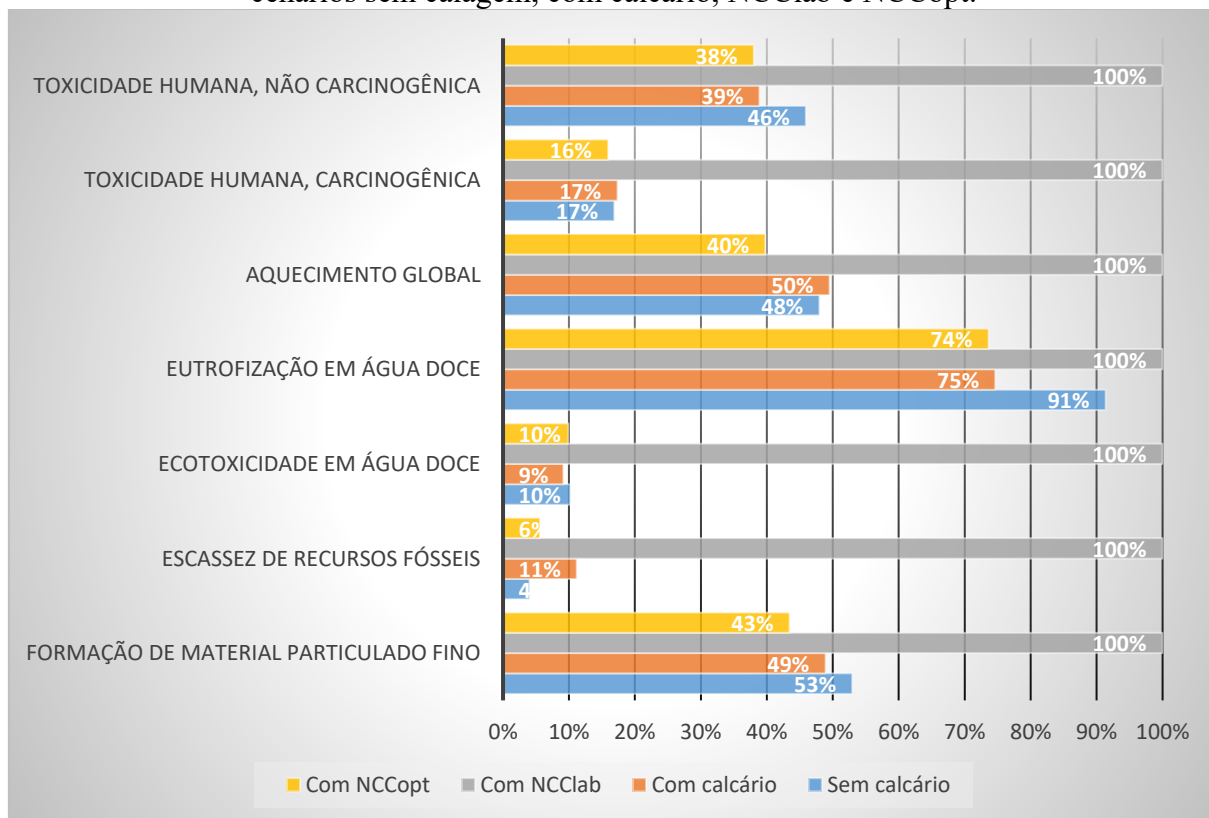
Para a soja, também considerando 1 kg de grãos como UF, o cenário com NCClab (Tabela 16) apresentou o maior impacto de Aquecimento Global, com 11,364310kg CO<sub>2</sub>e — aproximadamente duas vezes o valor do cenário com calcário (5,627050 kg CO<sub>2</sub>e) —, refletindo novamente a alta intensidade de emissões associada ao processo laboratorial de produção do NCC. A otimização do processo, contudo, altera de forma relevante essa hierarquia: no cenário com NCCOpt, o impacto cai para 4,517700kg CO<sub>2</sub>e, passando a ser cerca de 20 % menor que o do calcário convencional e aproximadamente 17 % inferior (Figura 23) ao cenário sem calcário (5,452140 kg CO<sub>2</sub>e).

**Tabela 16** – Impactos ambientais da produção de soja por categoria e cenário de manejo da acidez do solo (calcário, NCCLab, NCCOpt e sem calagem).

| Categoria de impacto                  | Unidade              | Sem calcário | Com calcário | Com NCCLab | Com NCCOpt |
|---------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Formação de material particulado fino | kg PM 2,5 eq         | 0,00835      | 0,00771      | 0,01577    | 0,00685    |
| Escassez de recursos fósseis          | kg óleo eq           | 0,06799      | 0,19016      | 1,70167    | 0,09481    |
| Ecotoxicidade em água doce            | kg 1,4-DCB eq        | 0,02147      | 0,01923      | 0,21047    | 0,02086    |
| Eutrofização em água doce             | kg P eq              | 0,0018       | 0,00147      | 0,00197    | 0,00145    |
| Aquecimento global                    | kg CO <sub>2</sub> e | 5,45214      | 5,62705      | 11,36431   | 4,5177     |
| Toxicidade humana, carcinogênica      | kg 1,4-DCB eq        | 0,03956      | 0,04069      | 0,23467    | 0,03736    |
| Toxicidade humana, não carcinogênica  | kg 1,4-DCB eq        | 1,88405      | 1,59519      | 4,10259    | 1,55898    |

**Fonte:** Autor, a partir de simulações no openLCA – método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

**Figura 23** – Comparação percentual dos impactos ambientais da produção de soja entre os cenários sem calagem, com calcário, NCCLab e NCCOpt.



**Fonte:** Autor, com base nos resultados obtidos no openLCA – método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

## 5.8 Interpretação dos resultados – alface e soja

### 5.8.1 Interpretação dos resultados para alface

O cenário sem calagem (C1) sofre penalização por unidade de produto devido à menor produtividade e ao maior consumo relativo de água e insumos.

O cenário com calcário (C2) é, novamente, a referência prática de manejo, apresentando boa produtividade e pegada relativamente baixa associada ao corretivo.

O cenário com NCClab (C3) destaca o impacto negativo de uma rota não otimizada de NCC, com forte aumento de diversas categorias de impacto, sobretudo toxicidades e ecotoxicidade.

O cenário com NCCopt (C4) apresenta um equilíbrio melhor entre viabilidade técnica e impacto ambiental, posicionando-se como alternativa prospectiva, embora ainda mais onerosa que o calcário em várias categorias.

### 5.8.2 Interpretação de categorias específicas para alface: água e ecotoxicidade

A alface representa um sistema agrícola intensivo, conduzido em áreas menores, de ciclo curto e com elevada demanda de irrigação, fertirrigação e pesticidas. A literatura e a modelagem apontam como *hotspots* principais: uso da água; ecotoxicidade associada a pesticidas; e perdas pós-colheita de produto fresco (Embrapa, 2024).

Nos quatro cenários avaliados, a resposta da alface à correção da acidez do solo segue lógica semelhante à da soja, mas com características próprias: em valor de pH ótimo ( $\approx 6,0-7,0$ ), a alface apresenta alto potencial produtivo (por exemplo:  $30\text{t ha}^{-1}$  de produto fresco). Em valor de pH 5,5 sem correção, a penalidade de rendimento estimada é da ordem de 20 %, levando a maior consumo de insumos e água por tonelada de produto.

No cenário sem calagem, observam-se impactos menores associados ao corretivo (que não é aplicado), mas a produtividade reduzida implica maior uso de água de irrigação e maior intensidade de fertirrigação por tonelada de alface e a necessidade de manter a produção comercial leva a maior área ou maior número de ciclos, o que aumenta a contribuição de categorias como uso da água, eutrofização e ecotoxicidade.

No cenário com calcário, o valor de pH é corrigido e a produtividade de referência é alcançada. Os impactos adicionais da calagem aparecem no GWP (pela reação de carbonato e pela cadeia de produção do calcário), mas a eficiência no uso de água e de fertilizantes por

tonelada de alface melhora, reduzindo a pressão sobre algumas categorias por unidade funcional.

Nos cenários com NCCLab e NCCopt (a otimização do NCCopt está centrada principalmente na substituição da demanda elétrica por uma fonte alternativa de calor), o comportamento segue a lógica da soja, com a diferença de que o sistema de alface é ainda mais sensível ao uso da água e à ecotoxicidade:

- O NCCLab adiciona ao sistema um corretivo com impactos extremamente elevados por kg, de modo que, mesmo em doses relativamente baixas, a contribuição do corretivo pode superar a de outros insumos em várias categorias. Em um sistema já intensivo, como o da alface, isso torna o cenário com NCCLab claramente não desejável do ponto de vista ambiental.
- O NCCopt reduz substancialmente o “peso ambiental” do NCC na alface, posicionando-se entre o calcário e o NCCLab em praticamente todas as categorias. Em algumas, como mudança do clima, ele permanece algumas vezes acima do calcário por kg; em outras, como consumo de água e ecotoxicidade, as diferenças ainda são pronunciadas devido à complexidade da rota de produção do nanomaterial.

Os resultados indicam que, na alface:

- O uso da água continua sendo a categoria dominante, fortemente influenciada pela irrigação, independentemente do corretivo;
- A ecotoxicidade está mais ligada ao uso de pesticidas e às perdas pós-colheita do que à calagem;
- O corretivo (calcário ou NCC) contribui de forma relevante, sobretudo para categorias associadas ao ciclo do carbono e à energia/fonte de calor empregada na produção do insumo.

### **5.8.3 Interpretação dos resultados para soja**

O cenário sem calagem (C1) não é ambientalmente preferível quando a unidade funcional é 1 t de grão, devido à penalidade de produtividade.

O cenário com calcário (C2) serve como referência de manejo: boa produtividade e impactos moderados associados ao corretivo.

O cenário com NCClab (C3) mostra que a rota laboratorial, tal como implementada, não é adequada para uso em escala, dada sua contribuição desproporcional em várias categorias de impacto.

O cenário com NCCopt (C4) é tecnicamente promissor: ainda mais impactante que C2 em poucas categorias, porém muito menos do que C3, e capaz de servir como base para discussões de *trade-offs* entre mitigação via CCU, desempenho agrônômico e impactos ambientais.

Esses resultados sustentam a opção metodológica de utilizar apenas o NCCopt como referência realista em análises prospectivas para soja, mantendo o NCClab como cenário experimental de limite superior de impacto.

#### 5.8.4 Interpretação de categorias específicas para soja: N<sub>2</sub>O e GWP

No caso da soja, o sistema de cultivo é extensivo, com elevada mecanização e uso intensivo de fertilizantes NPK e defensivos agrícolas. Os principais *hotspots* identificados na literatura e na modelagem são: emissões de N<sub>2</sub>O, associadas ao uso de fertilizantes nitrogenados (impactando o GWP), consumo de diesel nas operações mecanizadas e, em alguns contextos, impactos ligados à mudança no uso da terra em áreas de fronteira agrícola.

A comparação dos quatro cenários mostra comportamentos distintos quando os resultados são analisados por hectare e por tonelada de grão:

- Por hectare cultivado, o cenário sem calagem tende a apresentar valores ligeiramente menores em categorias diretamente associadas ao corretivo (por não haver emissão de CO<sub>2</sub> da reação do carbonato no solo nem impactos da produção de calcário ou NCC). Por outro lado, o solo permanece em valor de pH  $\approx 5,5$ , abaixo da faixa ótima para soja ( $\sim 6,0$ - $6,5$ ), o que implica penalidade de rendimento estimada em cerca de 25 % em relação ao cenário com valor de pH corrigido;
- Por tonelada de soja colhida, a situação se inverte: a menor produtividade no cenário sem calagem exige maior área e maior uso de insumos agrícolas por tonelada de produto, aumentando a contribuição relativa de fertilizantes, diesel e defensivos. Na prática, parte dos ganhos “aparentes” por hectare é anulada pela queda de

rendimento, resultando em impactos por tonelada que podem se igualar ou até superar aqueles observados nos cenários com correção da acidez.

No cenário com calcário, a aplicação do corretivo eleva o valor de pH para a faixa agronomicamente recomendada para a cultura da soja (valor do pH em água entre 5,5 e 6,0), permitindo que a produtividade de referência seja alcançada (por exemplo: 3,5 t ha<sup>-1</sup>) (Embrapa, 2020). Os impactos adicionais associados à calagem incluem emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da neutralização do solo, além dos impactos do ciclo de vida do corretivo (extração, moagem e transporte). A reação global de neutralização pode ser representada, de forma simplificada (Equação 2):



Nos cenários com NCCLab e com NCCopt, os impactos ambientais da etapa de corretivo são fortemente influenciados pelo perfil do NCC:

- O NCCLab apresenta valores de impacto por kg de produto muito superiores aos do calcário em praticamente todas as categorias (ordens de grandeza acima em toxicidades, ecotoxicidade e uso de recursos fósseis);
- O NCCopt, apesar de reduzir em aproximadamente 97 %-98 % os impactos em relação ao NCCLab ainda permanecem mais impactantes que o calcário por kg em categorias como mudança do clima, consumo de recursos fósseis, consumo de água e ecotoxicidade.

Quando se acoplam esses perfis à soja, observa-se que:

- Com NCCLab, a participação relativa do corretivo no impacto total por tonelada de soja pode se tornar desproporcionalmente alta, sobretudo em GWP, toxicidades e ecotoxicidade, tornando esse cenário ambientalmente inviável para qualquer aplicação em escala, servindo apenas como cenário de referência experimental.
- Com NCCopt, a contribuição da etapa de corretivo é menor do que no cenário com calcário, mas não domina o inventário: fertilizantes, diesel e, quando relevante, mudança no uso da terra permanecem como principais contribuintes. O aumento de

impacto devido ao NCCopt precisa ser ponderado diante de possíveis benefícios agronômicos (maior velocidade de neutralização, melhor distribuição no solo, estabilidade da acidez) e à integração com estratégias de captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa e de aumento do carbono no solo ( $\Delta$ SOC), que podem reduzir a pegada de carbono líquida do sistema.

De forma geral, a soja confirma o padrão esperado:

- Maior impacto em aquecimento global e uso da terra;
- Relevância de N<sub>2</sub>O de fertilizantes e possível contribuição da expansão agrícola;
- Papel do calcário e do NCC mais visível em indicadores relacionados ao carbono (CO<sub>2</sub> da calagem, pegada do corretivo) do que em categorias dominadas por fertilizantes e combustível.

## 5.9 Comparação entre culturas e entre cenários

Quando combinados, os resultados para soja e alface indicam que o NCC otimizado pode ser integrado a sistemas agrícolas como parte de estratégias de descarbonização e economia circular, desde que:

- A rota industrial seja efetivamente otimizada em termos energéticos;
- Os ganhos agronômicos (produtividade, reatividade, controle da acidez) sejam confirmados em campo;
- Os *trade-offs* ambientais identificados nas categorias de toxicidade, ecotoxicidade, recursos fósseis, água e PM<sub>2.5</sub> sejam explicitamente considerados em qualquer proposta de uso do NCC em larga escala.

A comparação entre soja e alface (Tabela 17) nos quatro cenários de manejo da acidez permite destacar alguns pontos estruturais:

- A soja apresenta maior impacto relativo em aquecimento global e uso da terra, em função do volume de produção, das emissões de N<sub>2</sub>O e, potencialmente, da mudança no uso da terra;

- A alface apresenta maior impacto em uso da água e ecotoxicidade, devido à irrigação intensiva, ao uso frequente de pesticidas e às perdas pós-colheita.

Em ambos os casos, a captura de CO<sub>2</sub> é biogênica. E a permanência varia: alface em curto prazo; grãos de soja em curto a médio prazo; parte lenhosa/resíduos e aumento de C no solo (SOC) podem representar armazenamento mais duradouro. Para “armazenamento”, recomenda-se modelar  $\Delta$ SOC (mudança no carbono do solo) explicitamente.

**Tabela 17** – Cenários de produtividade alface e soja (valor de pH 5,5 vs valor de pH 6,5).

| Cultura | Cenário (pH 5,5) | Penalidade (%) | Produtividade pH 5,5 (t ha <sup>-1</sup> ) | Produtividade pH 6,5 (t ha <sup>-1</sup> ) | Ganho (t ha <sup>-1</sup> ) | Ganho relativo (%) |
|---------|------------------|----------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Alface  | Baixa            | 15 %           | 25,500                                     | 30,000                                     | 4,500                       | 17,60 %            |
| Alface  | Média            | 20 %           | 24,000                                     | 30,000                                     | 6,000                       | 25,00 %            |
| Alface  | Alta             | 30 %           | 21,000                                     | 30,000                                     | 9,000                       | 42,90 %            |
| Soja    | Baixa            | 20 %           | 2,800                                      | 3,500                                      | 0,700                       | 25,00 %            |
| Soja    | Média            | 25 %           | 2,625                                      | 3,500                                      | 0,875                       | 33,30 %            |
| Soja    | Alta             | 35 %           | 2,275                                      | 3,500                                      | 1,225                       | 53,80 %            |

**Fonte:** Autor, com base em premissas agronômicas e dados de literatura (Embrapa, 2020; Teixeira *et al.*, 2022).

Em ambos os casos, o cenário sem calagem não se revela ambientalmente vantajoso quando os resultados são expressos por tonelada de produto: a aparente redução de impacto por hectare é compensada pela queda de produtividade e pelo aumento relativo da contribuição de fertilizantes, combustível e irrigação.

Os cenários com calcário e NCCopt são, portanto, os mais relevantes do ponto de vista prático. Em linhas gerais:

- O calcário apresenta menor impacto por kg (de alface) e fornece referência consolidada de manejo;
- O NCCopt adiciona um “pacote ambiental” maior por unidade de corretivo, mas pode oferecer vantagens agronômicas (maior reatividade, distribuição mais homogênea, potencial influência positiva sobre a dinâmica de carbono no solo), que precisam ser avaliadas com:

- A captura de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa (até ~12 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> para soja e ~3 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> para alface, em cenários de referência);
- o ΔSOC em função de práticas de manejo e dos efeitos do corretivo sobre a matéria orgânica do solo.

Do ponto de vista da pegada de carbono líquida, a combinação “NCCopt + manejo conservacionista” pode, em cenários específicos, aproximar-se ou mesmo superar o desempenho de sistemas com calcário — especialmente, quando se incorporam créditos de carbono associados à captura e ao armazenamento de CO<sub>2</sub> no solo e na biomassa. Contudo, essa conclusão depende de parâmetros agronômicos (ganho de produtividade, estabilidade do carbono) que ainda precisam ser consolidados em estudos de campo.

### **5.10 Implicações para a descarbonização da agricultura**

Os resultados berço ao campo para soja e alface reforçam algumas mensagens centrais do estudo:

- Não existe corretivo “neutro”: mesmo tecnologias baseadas em uso de CO<sub>2</sub>, como o NCC, carregam um conjunto significativo de impactos associados à sua produção, principalmente quando se trata de nanomateriais com rotas de síntese complexas;
- A rota laboratorial de NCC (NCClab) é ambientalmente inviável para uso em larga escala, devendo permanecer restrita ao papel de referência experimental para caracterização de material;
- A rota otimizada (NCCopt) demonstra que decisões de projeto de processo (fontes de calor, eficiência energética, rendimento) têm potencial de reduzir drasticamente os impactos por kg de produto, aproximando o NCC de um patamar em que a comparação com o calcário passa a ser tecnicamente significativa;
- Em sistemas agrícolas reais, a influência relativa do corretivo precisa ser avaliada no contexto do conjunto de insumos e processos: fertilizantes, diesel, irrigação e manejo do solo continuam respondendo por grande parte dos impactos.

A integração entre ACV, captura e uso de CO<sub>2</sub>, economia circular e mercados de carbono abre uma frente promissora para a descarbonização da agricultura, desde que as rotas

tecnológicas (como a do NCC) sejam concebidas desde o início com critérios de eficiência energética, uso racional de recursos e coerência agrônômica.

Para alface, cenário médio:

- Captura na biomassa:  $\sim 2,97\text{tCO}_2\text{ ha}^{-1}$  (massa aérea);
- Mais armazenamento no solo: valor menor em  $\Delta\text{SOC}$  (contribuição menor que a biomassa no cenário médio, mas mantida na estimativa);
- A distribuição das contribuições para o indicador aquecimento global na produção de alface é apresentada nas Figuras de 27 a 30 (Apêndice 6), em diagramas do tipo Sankey, que mostram os principais fluxos e processos responsáveis pelo resultado em cada cenário (C1, C2, C3 e C4) de manejo da acidez do solo.

A Tabela 18 ilustra, de forma exploratória, o valor potencial associado à captura de  $\text{CO}_2$  biogênico na biomassa e ao armazenamento de longo prazo no solo ( $\Delta\text{SOC}$ ) em sistemas de soja e alface, a partir de um cenário moderado. Para a soja, considerou-se uma captura aproximada de  $12\text{tCO}_2$  por ha ano na biomassa aérea e radicular, além de um  $\Delta\text{SOC}$  de  $+0,20\text{t C}$  por ha ano, equivalente a cerca de  $0,73\text{tCO}_2$  por ha ano, o que resulta em aproximadamente  $5,5\text{tCO}_2$  por ha acumulados em 10 anos de manejo conservacionista. Para a alface, adotou-se uma captura de cerca de  $2,97\text{tCO}_2$  por ha ano na biomassa fresca. O  $\Delta\text{SOC}$  da soja da cultura não foi equiparado ao da soja, por poder diferir substancialmente, em função do sistema de cultivo e das características do solo.

**Tabela 18** – Valor potencial da soja e da alface em créditos de carbono em cenário moderado de captura de  $\text{CO}_2$  biogênico e  $\Delta\text{SOC}$ .

| Componente                                | Quantidade<br>( $\text{tCO}_2\text{e ha}^{-1}$ ) | Valor a US\$5<br>$\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$ | Valor a US\$23<br>$\text{tCO}_2\text{e}^{-1}$ |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Soja – biomassa                           | 12,00                                            | US\$60,00                                    | US\$276,00                                    |
| Soja – armazenamento no solo (10 anos)    | 5,50                                             | US\$27,50                                    | US\$126,50                                    |
| Total soja (10 anos)                      | 17,50                                            | US\$87,50                                    | US\$402,50                                    |
| Alface – biomassa                         | 2,97                                             | US\$14,85                                    | US\$68,31                                     |
| Alface – armazenamento no solo (10 anos)* | $\approx 5,50$                                   | US\$27,50                                    | US\$126,50                                    |
| Total alface (10 anos)                    | $\approx 8,47$                                   | $\approx \text{US\$42,35}$                   | $\approx \text{US\$194,81}$                   |

**Fonte:** Autor, com base em estimativas de captura de  $\text{CO}_2$  na biomassa e cenários de  $\Delta\text{SOC}$  para soja e alface, combinados com faixas de preços de mercado de carbono (Reset, 2024; XP Investimentos, 2023; Sustainable Markets, 2024; World Bank, 2024).

Combinando essas quantidades de CO<sub>2</sub> com faixas de preços de créditos de carbono obtidas na literatura (por exemplo: US\$5 por tCO<sub>2</sub> como valor “baixo por brasileiro” e US\$23 por tCO<sub>2</sub> como valor “médio por internacional”), obtém-se uma ordem de grandeza do potencial econômico associado à mitigação via aumento de  $\Delta$ SOC e captura biogênica em sistemas agrícolas. Esses valores devem ser interpretados como estimativas exploratórias, dependentes de hipóteses de permanência do carbono, adicionalidade, metodologia de verificação e desenho de mercado (voluntário ou regulado).

A parcela de armazenamento no solo pode variar muito entre culturas, manejo e solo; por isso, o valor para alface pode ser bem menor (Leifeld, 2023). Um dos pilares da economia circular é adotar uma visão de ciclo de vida, isto é, considerar o sistema desde o *design* e a produção até o uso, a logística e o pós-uso, buscando manter valor e reduzir perdas ao longo da cadeia (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Ao analisar o ciclo completo, é possível identificar pontos críticos e oportunidades de *redesign*. A metodologia de ACV é hoje uma das mais consolidadas nesse processo.

## 5.11 Considerações adicionais

Dados iniciais (produto, energia e água) nem sempre são mensurados na unidade de uso no ACVI, como 20 L min<sup>-1</sup> de gás obtidos da fonte de emissões que necessitam ser adaptados para seu uso no inventário; desse modo, devem ser transformados e convertidos para kg ou gramas de CO<sub>2</sub>. A exemplo desse processo, tem-se o caso da água (em litros), onde há a necessidade de selecionar o “fluxo de produto” e o “fluxo elementar” como *input* no processo de avaliação de inventário.

Outro *input* relevante é a energia. O consumo de energia dos equipamentos relacionados com o ciclo de vida do produto ou da produção deve ser conhecido para o ACVI, porém, mesmo com as informações técnicas do fornecedor, pode ocorrer um desgaste e uma fadiga mecânica ao longo da vida útil, e isso dificulta a previsão do real consumo de energia.

Uma das principais vantagens do NCC como insumo agrícola é o seu potencial de produção em regiões com reservas limitadas de calcário agrícola, como as regiões Norte e Sul do país, o que pode reduzir a dependência logística de longas distâncias e ampliar a oferta regional de corretivos de acidez do solo. Essas áreas possuem emissões de CO<sub>2</sub> disponíveis provenientes de usinas termelétricas e/ou do processamento da cana-de-açúcar, tornando-as locais ideais para a produção deste nanocorretivo. Outra vantagem significativa é que o

nanocorretivo oferece uma solução sustentável para o descarte adequado de efluentes gasosos resultantes da queima de carvão, alinhando-se ao objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 13 – Ação Climática, conforme descrito na *Agenda 2030*, da Organização das Nações Unidas (ONU, 2016). No entanto, a efetividade ambiental dessa rota depende do balanço líquido de emissões e da intensidade energética do processo de captura e conversão — o que deve ser avaliado por métricas de ciclo de vida (IPCC, 2022).

Os resultados da ACV enfatizam ainda mais os benefícios ambientais deste processo. Por exemplo, o potencial de temperatura global em 100 anos (GTP 100a) é de 0,016530764 kg CO<sub>2e</sub> e, em 20 anos (GTP 20a), de 0,023266705 kg CO<sub>2e</sub>. Da mesma forma, o potencial de aquecimento global em 100 anos (GWP 100a) é de 0,019182549 kg CO<sub>2e</sub> e, em 20 anos (GWP 20a), de 0,024934502 kg CO<sub>2e</sub>. Esses resultados demonstram a eficácia da captura de CO<sub>2</sub> e sua conversão em NCC na mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Além disso, essa tecnologia gera inovações agrícolas importantes que, após validação em campo, podem aumentar a produtividade das culturas. Isso se relaciona diretamente com o ODS 2, que visa erradicar a fome e promover a agricultura sustentável (Zhou *et al.*, 2024). Um aspecto importante a ser considerado é que o NCC também contribui para a precificação do carbono — especificamente, para o CO<sub>2</sub> residual, apoiando a transição para uma economia de baixo carbono (Dill, 2023). Essa atividade está alinhada com iniciativas lideradas pelo Banco Mundial relacionadas à precificação de carbono e ao desenvolvimento da agricultura sustentável, principalmente em países que dependem fortemente de energia proveniente do carvão fóssil (Wettestad *et al.*, 2020).

Mesmo que a humanidade reduza drasticamente as emissões de dióxido de carbono num futuro próximo, o mundo ainda precisará remover entre 450 bilhões e 1,1 trilhão de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> até 2100, dependendo do ritmo de mitigação e do cenário considerado (Smith *et al.*, 2023). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU afirmou, em 2022, que o uso de tecnologias de remoção de CO<sub>2</sub> será “inevitável” se o mundo quiser atingir suas metas de emissões líquidas zero (Küller, 2024). No entanto, especialistas alertam que o setor precisará de um desenvolvimento substancial nos próximos 10 anos (International Energy Agency, 2023). Atualmente, estima-se que apenas 0,1 % das emissões globais são capturadas por essa tecnologia (World Resources Institute, 2025).

A nanotecnologia tem sido apontada como estratégia para aumentar a eficiência de uso de nutrientes (NUE) em sistemas agrícolas, sobretudo por meio de fertilizantes de liberação lenta/controlada baseados em nanomateriais, capazes de reduzir perdas por lixiviação, volatilização e escoamento superficial (Haydar *et al.*, 2024).

Esses nanofertilizantes podem ser formulados como fertilizantes nanoencapsulados, nanorrevestidos (por películas poliméricas) ou nanocompósitos que incorporam nutrientes em matrizes nanoporosas (como sílicas mesoporosas e argilas), permitindo modular a cinética de liberação e sincronizá-la com a demanda das culturas (Lawrencia *et al.*, 2021).

No caso de nanocarbonatos, o uso está mais bem fundamentado como fonte de Ca ou nanocorretivo e como componente que pode ser integrado a rotas de CCU por mineralização do CO<sub>2</sub>, sem implicar, necessariamente, conversão direta em “nutriente nitrogenado” para as plantas (Gupta, 2025).

A análise dos quatro gráficos gerados e apresentados como as Figuras 17, 18, 19 e 20 demonstrando a contribuição das categorias de impacto, oriundos da ACV do NCC, indica que a eletricidade foi a maior responsável para a mudança climáticas GWP e GTP.

De todos os equipamentos usados, o uso da estufa apresentou o maior consumo de energia, comparado a outros equipamentos. Considerando o consumo geral de energia de todo o processo, pode-se pensar em substituir a secagem por estufa por um método de secagem sustentável e barato.

A interpretação dos resultados considerou as limitações descritas na Metodologia: uso de dados secundários em partes do inventário; ausência de modelagem explícita de mudança de uso da terra; fronteiras até o “campo” (sem incluir processamento, consumo e fim de vida); nível de maturidade tecnológica intermediário do NCC (entre TRL 4 e 5); e representação simplificada de  $\Delta$ SOC e de aspectos espaciais/temporais das emissões.

Apesar dessas limitações, o presente estudo oferece algumas implicações para o desenvolvimento futuro de tecnologias de CCU aplicadas à agricultura. Os resultados evidenciam que:

- A engenharia de processo é determinante: a passagem de um processo de bancada (NCClab) para uma rota otimizada (NCCopt) pode reduzir impactos em ordens de grandeza, mas ainda exige integração com fontes de energia de baixa intensidade de carbono;
- A decisão sobre a substituição parcial ou total do calcário por NCC deve considerar não apenas a pegada de carbono, mas também toxicidades, ecotoxicidade, uso da água e escassez de recursos fósseis, evitando avaliações baseadas em um único indicador;
- Há necessidade de ensaios de campo em escala maior para validar os ganhos agronômicos observados em casa de vegetação, avaliar doses, frequência de

aplicação, efeitos sobre a acidez ao longo do tempo e impactos na microbiota e na estrutura do solo.

Por fim, aprimoramentos metodológicos podem ser incorporados em estudos subsequentes, incluindo mudança de uso da terra (LUC), espacialização de emissões e modelagem dinâmica de  $\Delta$ SOC com dados regionais e séries temporais — especialmente, para contextos de Cerrado e zonas de transição amazônica.

Em síntese, os resultados indicam que o NCC produzido via CCU apresenta potencial para contribuir com estratégias de descarbonização e de economia circular quando o sistema é concebido com rigor técnico, isto é, com processo de produção otimizado e baixa intensidade de carbono, inventários transparentes e fronteiras bem definidas na ACV, e aplicação agrícola integrada a práticas de manejo que preservem a produtividade, a conservação do solo, a manutenção e o aumento de estoques de carbono.

---

## 6 CONCLUSÕES

---

O presente estudo avaliou, em perspectiva de avaliação de ciclo de vida, uma rota de captura e uso de carbono (CCU) para síntese de nanocarbonato de cálcio (NCC) e sua aplicação como corretivo da acidez do solo. Foram comparados quatro cenários de manejo (sem calagem, com calcário, NCCLab e NCCOpt) em sistemas agrícolas de alface e soja no escopo berço ao campo, além de uma ACV berço ao portão para a produção de NCC (NCCLab e cenário otimizado NCCOpt). A validação agrônômica experimental foi conduzida em casa de vegetação com alface; a soja foi incluída por modelagem como cultura representativa de sistemas extensivos no Brasil.

Na ACV berço ao portão, o processo laboratorial (NCCLab), nas condições implementadas, apresentou impactos elevados por unidade de produto em múltiplas categorias, com predominância da demanda energética e de operações unitárias típicas de bancada. Dessa forma, o NCCLab deve ser interpretado como cenário experimental para a caracterização do material e a calibração do inventário, e não como alternativa viável para escala de campo. O cenário otimizado (NCCOpt), proposto a partir da identificação de pontos críticos do NCCLab, reduziu os impactos em ordens de grandeza, tornando a rota mais plausível para análises prospectivas. Contudo, por unidade de massa, o NCCOpt ainda tende a apresentar impactos superiores aos do calcário em categorias como escassez de recursos fósseis, uso da água e toxicidades, reforçando a necessidade de avaliação multicritério e de otimizações adicionais associadas à eficiência energética e à matriz elétrica.

A ACV berço ao portão mostrou que o NCCLab apresenta impactos elevados em praticamente todas as categorias avaliadas, refletindo baixa eficiência energética, uso prolongado de equipamentos de bancada e maior intensidade de insumos por quilograma de produto. Nessa configuração, as emissões associadas ao processo superam amplamente o benefício potencial da fixação de CO<sub>2</sub>, o que restringe o NCCLab ao papel de cenário experimental para caracterização de material.

A partir da identificação de *hotspots* na rota laboratorial, foi proposto um cenário de processo otimizado (NCCOpt), com melhorias em rendimento, consumo de energia e configuração das operações unitárias. Essa otimização reduziu os impactos por quilograma de NCC em ordens de grandeza em relação ao NCCLab, mas o produto permaneceu, em geral, mais impactante que o calcário agrícola por unidade de massa — em especial, em categorias ligadas

a uso de recursos fósseis, água e toxicidades. A rota otimizada (NCCopt) reduziu drasticamente os impactos, mas ainda não se igualou ao calcário por kg.

Para a soja e alface, o cenário sem calagem não é ambientalmente preferível por kg de produto, nem tecnicamente recomendável do ponto de vista agrônomo. A ACV berço ao campo evidenciou que, embora o cenário sem correção de acidez apresentasse valores ligeiramente menores por hectare nas categorias diretamente associadas ao corretivo, a redução de produtividade em meio ácido aumentou o consumo relativo de área, água, fertilizantes, defensivos e energia por tonelada produzida.

Quanto à alface, embora o NCCopt reduzisse substancialmente os impactos em relação ao NCCLab, o calcário ainda se manteve como alternativa de menor impacto no indicador climático no conjunto de cenários avaliados, indicando que o benefício ambiental do NCCopt é dependente do contexto produtivo e do perfil de impactos considerado.

Em termos de potencial econômico exploratório, a quantificação exploratória de faixas de preços de créditos de carbono, combinada com estimativas de captação de CO<sub>2</sub> biogênico na biomassa e cenários de variação de carbono orgânico do solo ( $\Delta$ SOC), permitiu estimar ordem de grandeza de valor potencial por hectare para soja e alface. Observou-se maior potencial para soja, principalmente pela maior captação na biomassa. Tais valores devem ser interpretados como indicativos, pois dependem de critérios de elegibilidade e integridade (adicionalidade, permanência, mensuração e verificação).

Quanto às hipóteses, conclui-se que: H1 foi parcialmente confirmada, pois o NCCopt apresentou desempenho ambiental substancialmente superior ao NCCLab, mas não se mostrou sistematicamente inferior ao calcário em todas as categorias e condições; H2 foi confirmada, uma vez que o NCCLab apresentou impactos elevados e se adequa como referência experimental; e H3 foi parcialmente confirmada, pois a inclusão de captação biogênica e  $\Delta$ SOC melhora o balanço climático e permite discussão de valor potencial em créditos de carbono; porém, os resultados são sensíveis a hipóteses de permanência e a incertezas de quantificação.

O NCC possui potencial substancial para reduzir a pegada de CO<sub>2</sub>. Principalmente, quando aplicado de forma sustentável na agricultura. A adoção dessa tecnologia pode promover práticas industriais e agrícolas mais sustentáveis, alinhando-se aos objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas e promoção da segurança alimentar. No entanto, o desenvolvimento e a implementação de aplicações baseadas em NCC devem ser acompanhados por uma avaliação rigorosa dos riscos e benefícios, para garantir sua viabilidade ambiental e potencial econômico a longo prazo.

---

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

Os resultados do presente estudo indicaram que a viabilidade ambiental do NCC depende fortemente do aperfeiçoamento do processo produtivo e da forma como o insumo é integrado a sistemas agrícolas reais. Nesse sentido, uma primeira linha de desdobramento consiste em avançar a rota NCCopt para escala-piloto, com medições detalhadas de consumo de energia, água e reagentes, de modo a substituir hipóteses de otimização por dados operacionais. Essa etapa deve incluir a avaliação de diferentes configurações de secagem, a integração com fontes de energia de menor intensidade de carbono e a análise de alternativas de fornecimento de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CO}_2$  em contextos industriais concretos.

Em paralelo, são necessários ensaios de campo em escala agrônômica com NCCopt, em diferentes tipos de solo e condições edafoclimáticas, para validar e refinar as evidências obtidas em casa de vegetação. Esses ensaios devem contemplar: doses e formas de aplicação; comportamento temporal do valor de pH; respostas de produtividade em culturas anuais e hortaliças; efeitos em atributos físicos, químicos e biológicos do solo; e possível influência na dinâmica de carbono orgânico ( $\Delta\text{SOC}$ ). A partir desses dados, será possível recalibrar os cenários de ACV berço ao campo com inventários agrícolas mais próximos da realidade de uso do NCC.

Adicionalmente, recomenda-se explorar aprimoramentos metodológicos que não integraram o escopo-base do presente estudo, com foco em reduzir incertezas e ampliar a representatividade regional das avaliações. Entre esses aprimoramentos, destacam-se: (i) a inclusão explícita de mudança de uso da terra (LUC, *land use changes*), quando pertinente ao contexto analisado; (ii) a espacialização de emissões e impactos, considerando variações de solo, clima e práticas de manejo; e (iii) a evolução da representação de  $\Delta\text{SOC}$  de cenários exploratórios para abordagens dinâmicas apoiadas em séries temporais e dados de campo. Esses avanços são particularmente relevantes em análises voltadas para crédito de carbono, nas quais permanência e adicionalidade do carbono no solo assumem papel central.

Do ponto de vista econômico e regulatório, há espaço para integrar os resultados deste estudo às análises técnico-econômicas e de viabilidade em mercados de carbono, estimando custos de produção, custo de mitigação por tonelada de  $\text{CO}_2$  equivalente evitada e possíveis receitas provenientes de créditos de carbono associados à captura de  $\text{CO}_2$  em NCC e a ganhos de produtividade agrícola. Estudos combinando ACV, análise de custos e diferentes desenhos

de políticas públicas poderiam apoiar decisões de investimento em rotas de CCU voltadas para insumos agrícolas.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros explorem comparações mais amplas entre o NCC e outras estratégias de manejo de solo e fertilização, incluindo corretivos alternativos, produtos de remineralização e insumos de origem biogênica. Essa comparação em portfólio, sempre apoiada em ACV, permitirá posicionar o NCC não apenas em relação ao calcário, mas quanto a um conjunto mais abrangente de tecnologias de agricultura de baixo carbono, contribuindo para a construção de trajetórias tecnológicas consistentes com os compromissos climáticos assumidos pelo Brasil no período pós-COP30. O uso de inteligência artificial e de *machine learning* pode ser explorado para apoiar a otimização de processos e a previsão de cenários de impacto ambiental em estudos de ACV.

---

8 REFERÊNCIAS

---

- ABNT NBR ISO 14044:2009 (2009). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT NBR ISO 14040:2006 (2006). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Brasil.
- Aboueata W, Hijawi U, Al-Kababji A, Mohieddine A, Choe A. (2021). Statistical Analysis of Renewable and Non-renewable Energy Consumption against Population Growth. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 726(1), 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/726/1/012003 Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/726/1/012003/>.
- Aguilar VF, Santos LL, Silva EB, Caldeira ZV, e Lafetá BO. (2021). Comparison between Limestone and Silicate Corrective Associated Gypsum in the Growth of a Forage Grass. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 52, p. 1484-1492. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885691>.
- Andrade RS, Zeidler VGZ. (2025). A química verde e sustentável: Dos princípios à inserção na educação química. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, 24(1), p. 208-229. Disponível em: [http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen24/REEC\\_24\\_01\\_11\\_ex2073\\_904.pdf](http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen24/REEC_24_01_11_ex2073_904.pdf).
- Antony A, Ramachandran JP, Ramakrishnan RM, Raveendran P. (2018). Sizing of Paper with Sucrose Octaacetate Using Liquid and Supercritical Carbon Dioxide as a Green Alternative Medium. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization; Volume 28, p. 306-312. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.10.011>.
- Appel AL, Alves LDA, Braga TEN, e Rodrigues T. (2020). Gestão editorial de periódico científico de acesso aberto em consolidação: análise da Revista latino-americana em avaliação do ciclo de vida (LALCA). Ciência da informação em revista, 7(10-22). Disponível em: <https://doi.org/10.28998/cirev.%25y710-22> .
- Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola – ABRACAL (2016). Metodologia Oficial de Análise de Corretivos de Acidez; 3Ed. Disponível em: <https://abracal.com.br/site/> Acesso em: 23 fev. 2026.

- Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola – ABRACAL (2026). Estatísticas: consumo aparente no Brasil entre 1994 a 2024; 3Ed. Disponível em: <https://abracal.com.br/site/> Acesso em: 12 mar. 2026.
- Artaxo, P. (2025). COP-30 e o agravamento da crise climática – Caminhos para a construção de uma sociedade sustentável. July 2025 - Estudos Avançados 39(114). Disponível em: [DOI:10.1590/s0103-4014.202539114.003](https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202539114.003)
- BBC News Brasil. (2021). CO<sub>2</sub>: os gráficos que mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos. Recuperado de <https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520>.
- Banboukian A, Chen Y, Thomas VM. (2025). The challenges of controlled environment hydroponic farming: a life cycle assessment of lettuce. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 30, p. 1691-1704. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02463-6>.
- Barbieri JC. (2007). Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. São Paulo: Saraiva. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-39512004000200010>.
- Barecka MH, Ager JW, Lapkin AA. (2021). Economically Viable CO<sub>2</sub> electroreduction embedded within ethylene oxide manufacturing. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0EE03310C>.
- Battistelle RAG, Bezerra BS, e Andrade DF. (2020). Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. Revista Ambiente Construído, 20(1), p. 313-328. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.882>
- Berahir, NH, Lahuri, HM, Mohd Noh, MG, Onn, MS, e Othman, R. (2019). CO<sub>2</sub> Mineralization: Production of Precipitated Calcium Carbonate as a Method of CO<sub>2</sub> Utilization. International Journal of Engineering and Technology, 7(4.14), p. 65-70. Disponível em: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.14.27521>.
- Bossolani JW, Crusciol C, Merloti LF, Costa NR, Tsai SM, Kuramae EE. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. Geoderma. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>.
- Brasil** (2024). Lei nº 15.042, de 11.12.2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). DO da União, Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2024/dezembro/Sancionada-a-lei->

[que-estabelece-as-bases-para-um-mercado-regulado-de-carbono-no-Brasil 12 dez. 2024.](#)

Acesso em: 17 jan. 2026.

Brasil (2025). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Plano Clima 2024–2035.

Brasília, Disponível em: portal oficial do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Acesso em: 09 maio 2026.

Briceño D. (2019). Análisis de ciclo de vida ambiental (ACV) y económica (ACCV) de la producción de bioqueroseno a partir de resina. Trabajo fin de Máster (Dissertação).

Disponível em: [https://oa.upm.es/57296/1/TFM\\_Daniela\\_Aquino\\_Briceno.pdf](https://oa.upm.es/57296/1/TFM_Daniela_Aquino_Briceno.pdf).

Brito TRC, Aranha JTM, Fernandes-Silva AA, Santos, LAC, Fragoso R. (2022). A Review and Analysis of Life Cycle Assessment Tendencies in the Brazilian Soybean Supply Chain.

Biology e Environment Proceedings of the Royal Irish Academy. Disponível em: <https://DOI:10.20944/preprints202511.0393.v1>

Casarin AR. (2024). Renováveis limitaram crescimento das emissões globais em 2023. Portal

Solar – Documento online artigos/notícias 04.03.2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias> Acesso em: mar. 2024

Chang, R, Kim S, Lee S, Choi S, Kim M, e Park Y. (2017). Calcium Carbonate Precipitation for CO<sub>2</sub> Storage and Utilization: A Review of the Carbonate Crystallization and Polymorphism.

Frontiers in Energy Research, Sec. Carbon Capture, Utilization and Storage. Volume 5. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00017>.

Coelho LMG, Lange L. (2018). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.026> .

Coltro L, Mourad AL, Garcia EEC, Queiroz GC, Gatti JB, Jaime SBM. (2007) Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA/ITAL.

(Livro) ISBN 978-85-7029-083-0. Disponível em: [https://www.academia.edu/7264370/ACV\\_como\\_ferramenta\\_de\\_gestao](https://www.academia.edu/7264370/ACV_como_ferramenta_de_gestao).

Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS (2021).

Proposta de Marco Regulatório para o Mercado de Carbono Brasileiro. Disponível em: <https://cebds.org/wpcontent/uploads/2021/08/cebds.org-mercado-de-carbono-marco-regulatorio-mercado-carbonomarco-regulatorio-sem-olhos.pdf> Acesso em: 25 fev 2026.

Consoli F, Allen D, Boustead I, Fava J, Franklin W, Jensen AA, de Oude N, Parrish R, Perriman R, Postlethwaite D, Quay B, Séguin J, Vigon B. (eds.). (1993). Guidelines for life-cycle

assessment: a “Code of Practice”. From the SETAC Workshop held at Sesimbra,

- Portugal, 31 March–3 April 1993. Brussels/Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC, 69 p. ISBN: 9056070037.
- COP30 (2025). 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP30) - Brasil Amazônia. Brasília, DF: Governo Federal, Disponível em: <https://cop30.br/>. Acesso em: 11 fev. 2026.
- Copernicus Climate Change Service (2025). Global Climate Highlights 2024. Recuperado em 6 de fevereiro de 2025, de <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>.
- Costa LMM, Olyveira GM, Salomão R. (2017). P(Etapa I) (Etapa I)recipitated calcium carbonate nano-microparticles: applications in drug delivery. *Advances in Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 3(2):336-340. Disponível em: [10.15406/atroa.2017.03.00059](https://doi.org/10.15406/atroa.2017.03.00059).
- CredCarbo. (2025). Créditos de carbono: valor e preço atual. São Paulo: CredCarbo, 2025. Disponível em: <https://credcarbo.com/carbono/creditos-de-carbono-valor-e-preco-atual-em-2022/>. Acesso em: 11 maio 2025.
- Deer WA, Howie RA, Zussman J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals*. 3. ed. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 498 p. ISBN: 978-0903056-33-5.
- Dill H. (2023). Carbon pricing initiatives and green bonds: are they contributing to the transition to a low-carbon economy? *Climate Policy*, 24(5), p. 529-544. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14693062.2023.2210107>.
- Earth Overshoot Day (2025). Conforme o site National Today, a previsão para o Earth Overshoot Day em 2025 é 24 de julho. Disponível em: <https://nationaltoday.com/earth-overshoot-day/>. Acesso em: 05 fev 2025.
- Egas D, Azarkamand S, Casals C, Llenas L, Colón J. (2023). Life cycle assessment of bio-based fertilizers production systems: where are we and where should we be heading? *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 28, p. 626–650. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02168-8>.
- Ellen Macarthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation. Disponível em: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/4384c08da576329c/original/Towards-a-circular-economy-Business-rationale-for-an-accelerated-transition.pdf>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2024). *Hortas: recomendações para cultivo no estado do Pará, DF (Cartilha)*. ISBN 978-65-5467-064-7. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168224/1/CartilhaHortas.pdf>.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2020). Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 347p. (Sistemas de Produção, n.17; e-ISSN 2176-2902). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223209/1/SP-17-2020-online-1.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2026.

Embrapa Agroenergia (2021). Nota técnica: Processo de obtenção de nanocorretivo a partir da mistura de gases. Brasília, DF, 23 nov. 2021. 3 p. Projeto Agricarbono (SEI 20.19.00.007.00.00). Assina: Sílvio Vaz Jr.

Emrich EB, Silva DRG, Chagas WFT, Silva CSC, Caputo ALC, Silveira MTP. (2013). Estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> pela aplicação de calcário para o Brasil e seus estados. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do solo - SC. Disponível em: <https://eventosolos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/2304.pdf>.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (2025) Balanço Energético Nacional, 2025 Relatório Síntese (ano-base 2024). Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: (PDF). [https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/entidades/cgt-eletrosul/acoes-e-programas/CGTEletrosul2021\\_D7\\_ENG\\_FINAL.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/entidades/cgt-eletrosul/acoes-e-programas/CGTEletrosul2021_D7_ENG_FINAL.pdf). Acesso em: 13 mar. 2026.

Evangelista PPA, Kiperstok A, Torres E, e Gonçalves JP. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>.

European Commission, JRC. (2010). ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment; Detailed guidance. European Platform on LCA (EPLCA). Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>.

FAO (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations; Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. ISBN 978-92-5-132974-0. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>. Acesso em: 25 fev. 2026.

Feijoo e Moreira MT. (2020). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Grupo de Biotecnología Ambiental. Departamento de Ingeniería Química. Instituto de Investigación CRETUS. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Disponível em: [10.13140/RG.2.2.11030.50240/1](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11030.50240/1).

Filonchik M, Peterson MP, Zhang L, Hurynovich V, e He Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O.

- Science of The Total Environment, 935. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>.
- Freeman BC, Bhonw AS. (2011). Assessment of the technology readiness of post-combustion CO<sub>2</sub> capture Technologies. Energy Procedia; ISSN 1876-6102; Vol. 4, p. 1791-1796. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.055>.
- Gao Y, Dong C, Chen S, Li Y, e Shi Y. (2023). Effect of Nano Carbon and Nano Calcium Carbonate Application on Soil Nutrient Dynamics in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). Communications in Soil Science and Plant Analysis. Volume 56 – Issue 20 Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2241502>.
- Ghanbaralizadeh R, Bouhendik H, Kabiri K, Vafayan M. (2016). A novel method for toughening epoxy resin through CO<sub>2</sub> fixation reaction. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, v. 16, p. 225-235. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.06.006>.
- Global Footprint Network. (n.d.). Earth Overshoot Day. Acesso em: 06 fev. 2025, Recuperado de <https://overshoot.footprintnetwork.org/>.
- Guggenheim S, e Koster van Groos AF. (2001). Mineralogy of Clays and Soils. Mineralogical Society of America. Disponível em: [DOI: 10.1346/CCMN.2001.0490509](https://doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490509).
- Guinee JB. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. Int J LCA 7, p. 311-313. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02978897>.
- Gupta S, Kant K, Kaur N, Jindal P, Ali A, Naeem M. (2025). Nano-calcium applications in modern agriculture: A review. Cleaner Agriculture and Food Systems. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100147>.
- Hanson E, Nwakile C, Hammed VO. (2025). Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO<sub>2</sub> emissions. Results in Surfaces and Interfaces, v. 18, art. 100381, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381>.
- Hasler K, Bröring S, Omta, SWF, e Olf HW. (2019). Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. European Journal of Agronomy, 69 (2015) 41–51 - Osnabrueck, Germany. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.001](https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.001).
- Haydar MS, Ghosh D, Roy S. (2024). Slow and controlled release nanofertilizers as an efficient tool for sustainable agriculture: Recent understanding and concerns. Plant Nano Biology. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100058>.
- Huseyin V, Tayeb S, Bendouma S. (2020). A case study of the life cycle impact of limestone quarrying on the environment – International Journal of Global Warming. Disponível em: [DOI: 10.1504/IJGW.2020.10033384](https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.10033384).

- Iberdrola. (2025). Carbon markets: emission allowances and carbon credits. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustainability/environment/environmental-management/carbon-markets-co2-emission-allowances>. Acesso em: 11 maio 2025.
- International Carbon Action Partnership, (2024). ICAP: Emissions Trading Worldwide: 2024 ICAP Status Report. Berlin: ICAP, 2024. Disponível em: (PDF). [https://icapcarbonaction.com/system/files/document/240522\\_report\\_final.pdf](https://icapcarbonaction.com/system/files/document/240522_report_final.pdf) Acesso em: 17 jan. 2026.
- International Chamber of Commerce, (2021). WayCarbon e ICC-Brasil - Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono – Relatório 2021. Disponível em: <https://www.iccbrasil.org/?s=credito+de+carbono> . Acesso em: 12 fev. 2025.
- International Energy Agency – IEA (2024). Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/8ad619b9-17aa-473d-8a2f-4b90846f5c19/NetZeroRoadmap\\_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/8ad619b9-17aa-473d-8a2f-4b90846f5c19/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf) Acesso em 23 mar 2026.
- IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T Tanabe K. Hayama: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
- Kazanç F, Zhang P, Saha P, e Lu Y. (2024). Techno-economic and life cycle environmental assessments of CO<sub>2</sub> utilization for value-added precipitated calcium carbonate and ammonium sulfate fertilizer co-production. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102992>.
- Küller M. (2024). Como funciona a captura e armazenamento de carbono – W Global Media Forum – Online document. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/como-funciona-a-captura-e-armazenamento-de-carbono/a-68195595>.
- Lang-Quantzendorff V, Dandres T, Sacchi R, Mendoza Beltran A, Duerr M, e D'Angelo A. (2025). Time-differentiating life cycle impact assessment methods: A systematic review. Journal of Cleaner Production. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.70068>.

- Lee J, Ryu K, Ha H, Jung K, e Lee J. (2020). Techno-economic and environmental evaluation of nano calcium carbonate production utilizing the steel slag. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.12.005>.
- LeClerc HO, Erythropel HC, Backhaus A, Lee DS, Judd DL, Paulsen MM, Ishii M, Long A, Ratjen L, Bertho GG, Deetman C, Du Y, Lane MKL, Petrovic PV, Champlin AT, Bordet A, Kaeffer N, Kemper G, Zimmerman JB, Leitner W, Anastas PT. (2024). The CO<sub>2</sub> Tree: The potential for carbon dioxide utilization pathways. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07582>.
- Leifeld J, Keel S.G. (2022). Quantifying negative radiative forcing of non-permanent and permanent soil carbon sinks. *Geoderma*, v. 423, 115971. Ed. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115971>.
- Leifeld, J. (2023). Carbon farming: climate change mitigation via non-permanent carbon sinks. *Journal of Environmental Management*, v. 339, 117893, Ed. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117893>.
- Martin, M, Soy SA, Carotti L, Orsini F. (2024). Environmental life cycle assessment of lettuce production in a container-based vertical farm. *European Journal of Horticultural Science*, v. 89, n. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/eJHS.2024/021>.
- MHE Museu Heinz Ebert (2025). Banco de Dados do Museu de história natural e jardim botânico da UFMG. Calcita. Disponível em: <https://museuhe.com.br/mineral/calcita-calcite/> . Acesso em: 08 fev. 2025.
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI-BR, (2024). Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. 2ª edição. Brasília: MCTI. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>.
- Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – MMA-BR (2024). Mitigação – 6ª edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/mitigacao>. Acesso em: 06 fev. 2026.
- Ministério de Minas e Energia – MME-BR (2024). Da Mineração à Mesa: a importância da mineração para a segurança alimentar GOV.Br. Disponível em: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/da-mineracao-a-mesa-a-importancia-da-mineracao-para-a-seguranca-alimentar?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/da-mineracao-a-mesa-a-importancia-da-mineracao-para-a-seguranca-alimentar?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 21 fev. 2026.

- Ministério de Minas e Energia - MME-BR (2024). Balanço Energético Nacional 2023. Brasília: MME. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- Morán A. (2024). Análisis de ciclo de vida (LCA) para procesos de transformación de plásticos. Universidad Estatal de Carolina del Norte (NCSU) – Palestra Virtual. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=b2NSldRZQHw> Acesso em: 11 dez. 2024.
- Morse JW, Mackenzie FT. (1990). Geochemistry of Sedimentary Carbonates. Developments in Sedimentology, v. 48. Amsterdam: Elsevier, 707 p. ISBN: 978-0-444-87391-0.
- Monteiro RA, Arana ARA, Osco LP. (2024). A Importância da análise do ciclo de vida aplicada a sustentabilidade ambiental no setor da construção civil. In dinâmicas socioambientais em Brasília DF: (Vol. 1, pp. 16-38). Editora Científica Digital doi.10.37885/241118075. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/241118075>.
- Moreira SG. (2024). Os 5 maiores estados produtores de calcário agrícola do Brasil. Compre Rural, 10 jun. 2024. Disponível em: <https://www.comprerural.com/conheca-os-5-maiores-estados-produtores-de-calcario-agricola-do-brasil/>. Acesso em: 8 fev. 2025.
- Mousavi A, Aghbolaghi EA, Khorramifar A, Gancarz M, Darvishi Y, Stasiak M, Miernik A, Karami H. (2022). Life Cycle Assessment for Environmental Impact Reduction and Evaluation of the Energy Indices in Lettuce Production. Applied Sciences, v. 12, n. 20, art. 10348. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app122010348>.
- Müller LJ, Kätelhön A, Bachmann M, Zimmermann A, Sternberg A, Bardow A. (2020). A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. Frontiers in Energy Research, v. 8, art. 15. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00015>.
- Navarro GRB, Zanardo A, Montibeller CC, Leme TG. (2017). Livro de referência de minerais comuns e economicamente relevantes: Carbonatos. Rio Claro: Museu de Minerais, Minérios e Rochas “Prof. Dr. Heinz Ebert”. Disponível em: <https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/02/Museu-HE-CALCITA.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2026.
- National Institute for Public Health and the Environment (2016). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). (s.d.). National Institute for Public Health and the Environment. RIVM Report 2016-0104. 2016. Disponível em: <https://www.rivm.nl/en>.
- Nemecek T.; Bretscher D.; Cirone F. (2025). Biogenic carbon accounting in LCA; International Journal of Life Cycle Assessment, in press, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02547-3>. [ira.agroscope.ch](http://ira.agroscope.ch).

- Nimerenco I, Soare BEL, e Panait DZ. (2024). Assessment of the Link between CO<sub>2</sub> Emissions and Socio-Economic Indicators. Publicado em Proceedings of the International Conference on Business Excellence. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/picbe-2024-0218>.
- Nordelöf A, Alatalo M, e Söderman ML. (2019). A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit – Part I: Design and composition. International Journal of Life Cycle Assessment, 24(1), 123–133. Disponível em: [10.1007/s11367-018-1503-3](https://doi.org/10.1007/s11367-018-1503-3).
- Oliveira AI, Armenteros MF, Inclán C. (2025). Projetos de carbono de alta integridade na Amazônia brasileira. Disponível em: <https://vcminTEGRITY.org/wp-content/uploads/2025/11/Projetos-de-Carbono-de-Alta-Integridade-na-Amazonia-Brasileira-Guia-Pratico-sobre-Conformidade-Legal-e-Salvaguardas-Socioambientais.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2026.
- Observatório do clima. (2025) Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa (SEEG): Plataforma SEEG – Território: Brasil. 2025. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/brasil>. Acesso em: 06 fev. 2026.
- Organização das Nações Unidas – ONU (2025). Centro Regional de Informação das Nações Unidas – população mundial chegará aos 10,3 mil milhões em 2080. Disponível em: <https://unric.org/pt/onu-populacao-mundial-chegara-aos-103-mil-milhoes-em-2080/>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- Organização das Nações Unidas – ONU (2016). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio). Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org>.
- Ostovari H, Sternberg A, Bardow A. (2020). Rock 'n' use of CO<sub>2</sub>: carbon footprint of carbon capture and utilization by mineralization. Sustainable Energy e Fuels, v. 4, n. 9, p. 4482-4496. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0SE00190B>.
- Pereira MA, e Campos PS. (2024). The Carbon Credit Market in Amazonas as an Instrument for Change in Riverside Communities. IOSR Journal of Business and Management. Disponível em: [DOI:10.9790/487X-2609130610](https://doi.org/10.9790/487X-2609130610).
- Poudyal L, Adhikari K e Won M. (2021). Mechanical and durability properties of Portland Limestone Cement (PLC) incorporated with Nano Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14040905>.
- Prolo CD, Penido G, Santos IT, La-Hoz-Theuer S. (2021). Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade. Disponível em:

<https://www.laclima.org/publicacoes/explicando-os-mercados-de-carbono-na-era-do-acordo-de-paris>. Acesso em: 15 mar. 2026.

- Qudrat U, Farzeen F, Shafiq URM, Muhammad AK, Ayesha I, Mohsin R, Hazib A, Muhammad Q, Ubaid U. (2024). Nanotechnological Innovations in Agrochemicals: Enhancing Efficacy and Environmental Stewardship in Pesticide and Herbicide Applications. Middle East Research Journal of Agriculture and Food Science. Disponível em: <https://doi.org/10.36348/merjafs.2024.v04i05>.
- Rao, ND, Mastrucci, A., e Min, J. (2018). Applying LCA to estimate development energy needs: The cases of India and Brazil. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66981-6>.
- Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida – RAICV (2019). Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro; - Brasília, DF: ISBN 978-85-7013-154-6. Disponível em: <https://raicvbrasil.wixsite.com/raicv>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- Reset. (2024). Preço do crédito de carbono segue em queda livre. Capital Reset, São Paulo, 22 nov. 2024. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/carbono/creditos-de-carbono/preco-de-credito-de-carbono-cai-18-no-mercado-voluntario/> Acesso em: 11 maio 2025
- Rodrigues A, Malato E. (2022). Quais são as formas de produção de energia elétrica no Brasil? - Publicado em 22/11/2022 por Equipe Replace. Disponível em: <https://replaceconsultoria.com.br/blog/producao-de-energia-eletrica-no-brasil/>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- Rogelj J, Shindell D, Jiang K, Fifita S, Forster P, Ginzburg V, Handa C, Kheshgi H, Kobayashi S, Kriegler E, Mundaca L, Séférian R, Vilariño MV. (2018). Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development. Geneva: IPCC/WMO, p. 93-174. Global Warming of 1.5 °C: an IPCC Special Report Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_Chapter2\\_High\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_High_Res.pdf) Acesso em: 15 mar. 2026.
- Sampaio J, Almeida FS. (2008). Calcário: Importância e Uso na Agricultura Brasileira. Revista Brasileira de Geociências, 2008. ISBN 978856121372 Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1105>.
- Santos MR, Teixeira CE, Kniess CT, Barbieri JC. (2016). CT, O uso da avaliação do ciclo de vida e da ecoeficiência para avaliar alternativas de valorização de resíduos: um estudo em empresa termelétrica. Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria,

- n. esp.9, p. 82-99, Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273449349007>. Acesso em: 11 mar. 2026.
- Simms, A. (2013). *Cancel the Apocalypse: The New Path to Prosperity*. London: Little, Brown. ISBN 10: 034912292X / ISBN 13.
- Smith S, Geden O, Nemet GF, Gidden M, Lamb WF, Powis C, Bellamy R, Callaghan M, Cowie A, Cox E. (2023). *The State of Carbon Dioxide Removal: 1st edition*. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO%2FW3B4Z> Acesso em: 05 fev. 2026.
- Souza, APR. (2022). *Avaliação de impacto ambiental do processo de obtenção de compósito do tipo Nanocarbonato de cálcio/Lignina Kraft a partir da captura de CO<sub>2</sub>*. 2022. 120 f. Dissertação (Mest.Eng. Quím.) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1145264/1/VAZ-JR-S.-DISSERTACAO.pdf>.
- Sustainable Markets Initiative. (2024). *Carbon markets and voluntary carbon credits: market trends and integrity considerations*. London: Sustainable Markets Initiative, 2024. Disponível em: <https://www.sustainable-markets.org/>. Acesso em: 11 maio 2025.
- Teixeira WG, Brasil EPF, Leandro WM, Souza JLO, Borges CCM, Araujo WA. (2022). Soil acidity indicators for liming in tropical acid soils cropped with soybean under short- and long-term no-tillage systems. *Journal of Agricultural Science*, v. 14, n. 8, p. 59. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v14n8p59>.
- UNFCCC. (2025). *UN Climate Change Conference – Belém, November (COP30)*. Bonn: United Nations Climate Change Secretariat, 2025. Disponível em: <https://unfccc.int/cop30/about-cop30>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- United Nations (2024). *Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects (2024). Summary of Results*. Disponível em: [https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024\\_Summary-of-Results.pdf](https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf). Acesso em: 12 mar. 2026.
- United Nations Environment Program, (2025). *UNEP Emissions Report – Gap Report 2024* Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>. Acesso em: 16 mar. 2026.
- United Nations Environment Program, (2025). *UNEP Emissions Report – Gap 2025: Nairobi*. Disponível em: <https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/EGR2025.pdf>.
- Vaz Jr. S, Souza AP. (2020) *Levantamento bibliométrico de tecnologias de captura de gás carbônico de fontes energéticas*. Embrapa Agroenergia ISSN 2177-0395; 26.

Disponível em:  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1132558/1/Levantamento-bibliometrico-de-tecnologias-2021.pdf>.

- Vaz Jr. S. (2021). Carbonato de Cálcio Precipitado para Aplicação como Nanocorretivo de Acidez do Solo Embrapa Nota Técnica - Projeto: Agricarbono (SEI 20.19.00.007.00.00) - Brasília, DF, 09 de dezembro de 2021.
- Vaz Jr. S, Souza, APR, Lobo Baeta, BE. (2022) Technologies for Carbon Dioxide Capture: A Review Applied to Energy Sectors. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100456. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>.
- Wettestad J., Gulbrandsen L, e Andresen S. (2020). Calling in the Heavyweights: Why the World Bank Established the Carbon Pricing Leadership Coalition, and What It Might Achieve. *International Studies Perspectives*. Disponível em: [Doi.org/10.1093/isp/ekaa013](https://doi.org/10.1093/isp/ekaa013).
- World Bank. (2025) State and Trends of Carbon Pricing 2025. Washington, DC: World Bank. DOI: 10.1596/978-1-4648-2127-1. Disponível em: [www.worldbank.org](https://www.worldbank.org). Acesso em: 25 mar. 2026.
- World Resources Institute – Brasil – WRI (2023). Os países que mais emitiram gases de efeito estufa. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa>.
- World Resources Institute – WRI (2025). Carbon Capture and Storage, Explained. Washington, DC. Topic Climate. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/carbon-capture-technology>. Acesso em: 28 dez. 2025.
- XP Investimentos. (2023). Mercado de carbono: perspectivas, oportunidades e desafios para o Brasil. São Paulo: XP Investimentos, 2023. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/esg/>. Acesso em: 03 maio 2025.
- Yang J, Gu F, Guo J, e Chen B. (2019). Comparative life cycle assessment of mobile power banks with lithium-ion battery and lithium-ion polymer battery. *Sustainability*, 11(7), 2034. Disponível em: [10.3390/su11195148](https://doi.org/10.3390/su11195148).
- Yoro KO, e Daramola M. (2020). CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. Livro: *Advances in Carbon Capture - Methods, Technologies and Applications*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>.
- Zhou K, Midkiff D, Yin R, e Zhang H. (2024). Carbon finance and funding for forest sector climate solutions: a review and synthesis of the principles, policies, and practices. *Frontiers in Environmental Science* DOI. Disponível em: [10.3389/fenvs.2024.1309885](https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1309885).

Zhou K, Liu T, e Zhou L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges, 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) DOI. Disponível em: [10.1109/FSKD.2015.7382284](https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284).

---

## 9 APÊNDICES

---

### A1. Cálculo Descritivo

A eficiência de captura de carbono na produção de NCC é de 5 % da pegada total de carbono. O cálculo é realizado utilizando o Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos (GWP 100a), que corresponde a 0,019182 kg CO<sub>2</sub>e, dividido pela pegada total de carbono na produção de NCC, que é de 0,053277kg CO<sub>2</sub>e.

### A2. Formatação de Componentes Matemáticos

Para converter 20L por minuto de gás (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) para gramas de CO<sub>2</sub>, precisamos obedecer aos seguintes passos:

#### A2.1 Converter L para metros cúbicos

Sabemos que 1 metro cúbico (m<sup>3</sup>) é igual a 1000 L.

30 min x 20L de gás (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) por min = 600L.

0,02m<sup>3</sup> por min x 30min = Volume de gás por minuto = 0,6 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>.

Composição do gás = 81 %N<sub>2</sub>, 11 %O<sub>2</sub>, 8 %CO<sub>2</sub>

Somente 8 % de CO<sub>2</sub> = 8 % de 600L = 48L de CO<sub>2</sub> = 0,048 m<sup>3</sup>

#### A2.2 Densidade do CO<sub>2</sub>

A densidade do CO<sub>2</sub> é aproximadamente 1,977 kg m<sup>-3</sup> em condições padrão (1atm. e 0 °C). Para converter isso para gramas por metro cúbico, multiplicamos pela massa molar do CO<sub>2</sub>.

#### A2.3 Massa molar do CO<sub>2</sub> e outros componentes

A massa molar do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é, aproximadamente, 44,01 g mol<sup>-1</sup>.

Ca (OH)<sub>2</sub> = Hidróxido de cálcio

H<sub>2</sub>O = Água

CaO = Óxido de cálcio

CO<sub>2</sub> = Dióxido de carbono

CaCO<sub>3</sub> = Carbonato de cálcio

Ca = 40,078 g mol<sup>-1</sup>

$$\text{H} = 1,00794 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\text{N} = 14,0067 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\text{O} = 15,9994 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\text{C} = 12,0107 \text{ g mol}^{-1}$$

Considerando a massa molar dos elementos temos a massa molecular:

|                     |                    |       |                     |
|---------------------|--------------------|-------|---------------------|
| Hidróxido de cálcio | $\text{Ca (OH)}_2$ | 74,10 | $\text{g mol}^{-1}$ |
|---------------------|--------------------|-------|---------------------|

|      |                      |       |                     |
|------|----------------------|-------|---------------------|
| Água | $\text{H}_2\text{O}$ | 18,02 | $\text{g mol}^{-1}$ |
|------|----------------------|-------|---------------------|

|                 |              |       |                     |
|-----------------|--------------|-------|---------------------|
| Óxido de cálcio | $\text{CaO}$ | 56,08 | $\text{g mol}^{-1}$ |
|-----------------|--------------|-------|---------------------|

|                    |               |       |                     |
|--------------------|---------------|-------|---------------------|
| Dióxido de carbono | $\text{CO}_2$ | 44,01 | $\text{g mol}^{-1}$ |
|--------------------|---------------|-------|---------------------|

|                     |                 |        |                     |
|---------------------|-----------------|--------|---------------------|
| Carbonato de cálcio | $\text{CaCO}_3$ | 100,09 | $\text{g mol}^{-1}$ |
|---------------------|-----------------|--------|---------------------|

#### A2.4 Converter para gramas de $\text{CO}_2$

$$\text{Volume de CO}_2 (\text{m}^3) = 0,048 \text{ m}^3$$

$$\text{Massa de CO}_2 (\text{kg}) = \text{Volume de CO}_2 (\text{m}^3) \times \text{densidade do CO}_2 (\text{kg m}^{-3}).$$

$$\text{Massa de CO}_2 (\text{kg}) = 0,048 \text{ m}^3 \times 1,977 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\text{Massa de CO}_2 (\text{kg}) = 0,095 \text{ kg}$$

Para obter a massa em gramas, multiplicamos por 1.000 (porque  $\text{kg} = 1.000 \text{ g}$ ):

$$\text{Massa de CO}_2 (\text{g}) = 0,095 \text{ kg} \times 1.000 \text{ g kg}^{-1}$$

$$\text{Massa de CO}_2 (\text{g}) = 95,1 \text{ g}$$

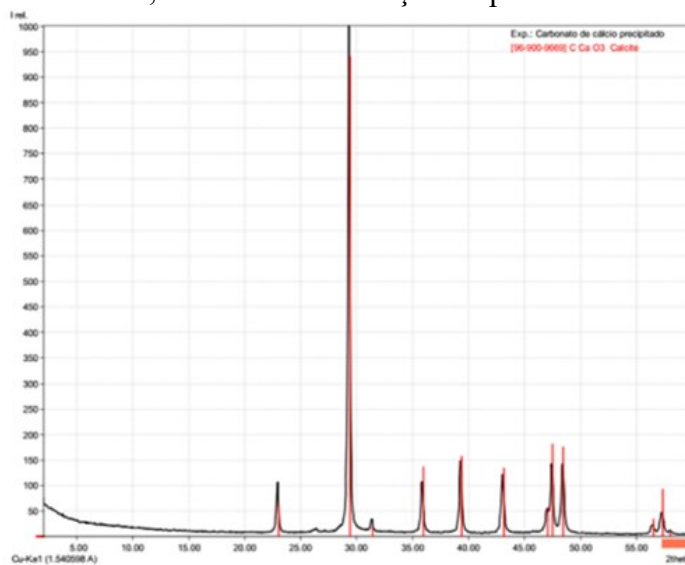
Portanto, 20 litros por minuto de emissões equivalem a aproximadamente 95,1 gramas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

A massa total de  $\text{CO}_2$  de *Input* é **95,1g**.

#### A3. Nanocarbonato de cálcio: difratograma de raios X (Figura 24) e fotos do NCC (Figuras 25 e 26)

O carbonato de cálcio precipitado obtido na Etapa 1 do Projeto utilizou suspensão aquosa e borbulhamento de gás capturado do processo de geração de energia termelétrica, caracterizando-se como um processo sustentável e não tóxico.

**Figura 24** – Difratoograma de raios X do carbonato de cálcio precipitado em escala nanométrica, indicando a formação do polimorfo calcita.

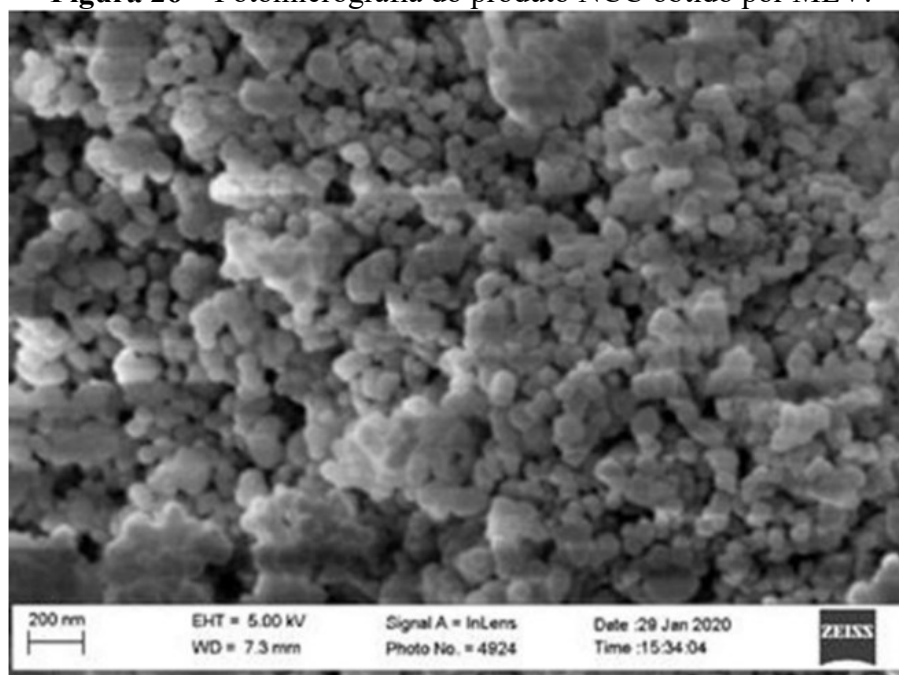


**Fonte:** Embrapa Agroenergia.

**Figura 25** – Produto obtido após secagem em estufa a 70 °C.



**Fonte:** Embrapa Agroenergia.

**Figura 26** – Fotomicrografia do produto NCC obtido por MEV.

**Fonte:** Embrapa Agroenergia.

**A4. Tabela 19** – Composição das emissões de gases de chaminé de termoeletrica.

| Informações dos Gases nas Condições da Chaminé     | UNIDADE                         | Coleta 1  | Coleta 2  | Coleta 3  | MÉDIA     |
|----------------------------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Umidade do Gás</b>                              | % v v <sup>-1</sup>             | 13,84     | 14,16     | 14,51     | 14,17     |
| <b>Dióxido de Carbono</b>                          | % v v <sup>-1</sup>             | 8,6       | 8,9       | 6,7       | 8,07      |
| <b>Oxigênio</b>                                    | % v v <sup>-1</sup>             | 11,3      | 11,1      | 13,4      | 11,93     |
| <b>Nitrogênio</b>                                  | % v v <sup>-1</sup>             | 80,1      | 80        | 79,9      | 80        |
| <b>Volume de água nas condições da Chaminé (1)</b> | Nm <sup>3</sup>                 | 0,162     | 0,1678    | 0,1709    | 0,1669    |
| <b>Temperatura dos Gases na Chaminé</b>            | °C                              | 82,3      | 81,8      | 97,3      | 87,1      |
| <b>Volume de Gás Condições Normais (1)</b>         | Nm <sup>3</sup>                 | 1,0075    | 1,0168    | 1,0059    | 1,0101    |
| <b>Volume de Gás Úmido Condições Normais (1)</b>   | Nm <sup>3</sup>                 | 1,1695    | 1,1846    | 1,1768    | 1,177     |
| <b>Vazão de Gases nas Condições da Chaminé</b>     | m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>  | 1.987.562 | 1.996.322 | 2.152.967 | 2.045.617 |
| <b>Vazão de Gases nas Condições Normais (1)</b>    | Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | 1.269.186 | 1.271.892 | 1.309.075 | 1.283.384 |

**Fonte:** Eletrobras CGTE.

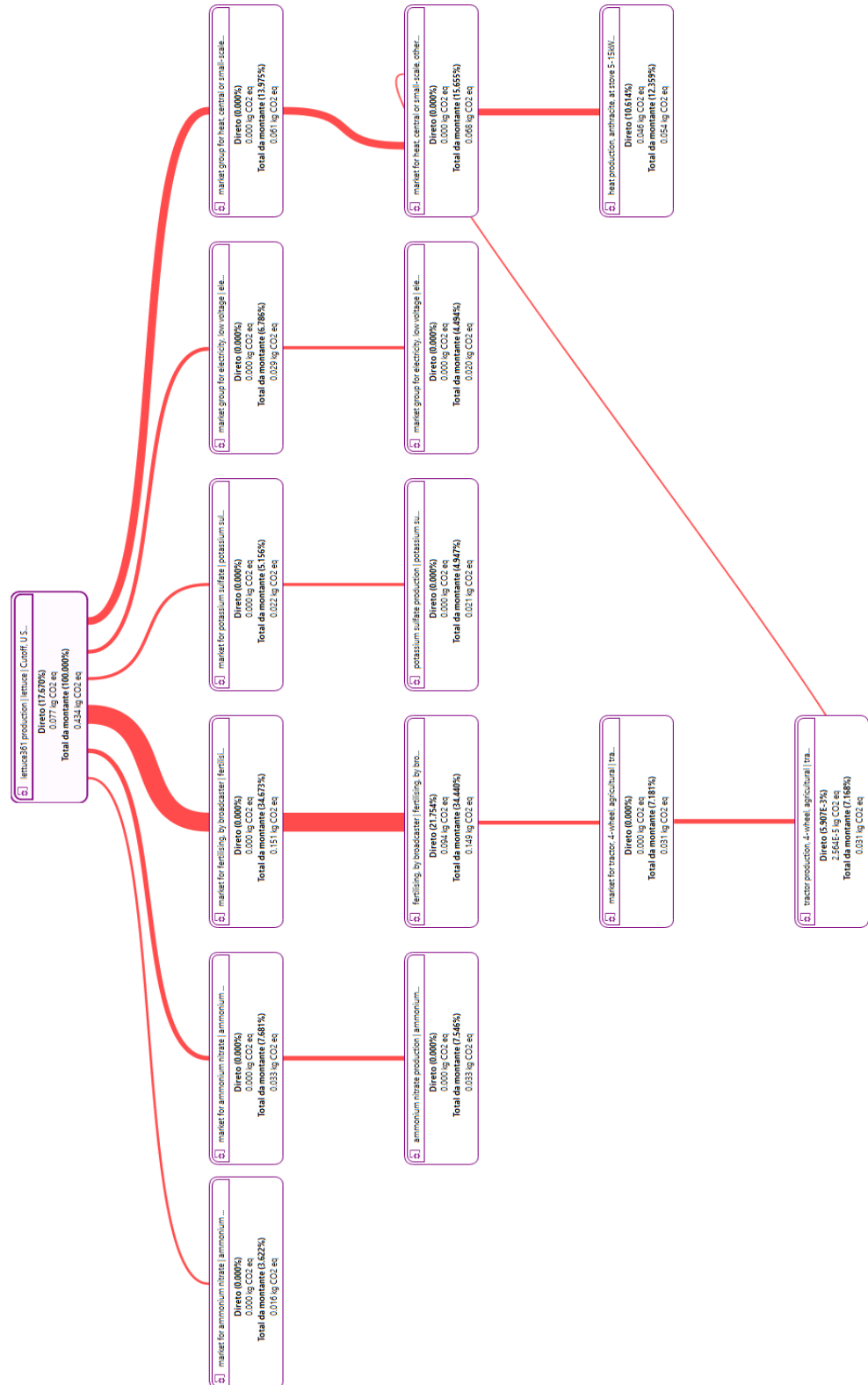
**A5. Tabela 20** – Equipamentos usados na Síntese de NCC.

| Nome do Equipamento                                               | Marca                    | Capacidade de processamento<br>(g, kg ou L) | Tempo de uso<br>(min) | Potência<br>(kW) | Valor em Energia |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| <b>Balança semianalítica</b>                                      | Sartorius                | 3.200 g                                     | 20                    | 0,01             | 0,00             |
| <b>Ebulidor</b>                                                   | ResisWall                | não se aplica                               | 10                    | 2,00             | 0,33             |
| <b>Bioreator 5 Solubilização Ca(OH)<sub>2</sub></b>               | Eppendorf                | 10 L                                        | 40                    | 0,98             | 0,66             |
| <b>Bioreator 5 Resfriam.suspensão Ca(OH)<sub>2</sub></b>          | Eppendorf                | 10 L                                        | 30                    | 0,98             | 0,49             |
| <b>Bioreator 5 fluxos de CO<sub>2</sub> 20 L min<sup>-1</sup></b> | Eppendorf                | 10 L                                        | 10                    | 0,98             | 0,16             |
| <b>Banho termostático</b>                                         | Thermo Scientific        | não se aplica                               | 30                    | 0,92             | 0,46             |
| <b>Homogeneizador tipo ultraTurrax</b>                            | IKA                      | 2 L                                         | 12,5                  | 0,50             | 0,10             |
| <b>Centrífuga de solo</b>                                         | Thermo Fisher Scientific | não se aplica                               | 120                   | 4,90             | 9,80             |
| <b>Bomba de vácuo</b>                                             | Solab                    | não se aplica                               | 30                    | 0,50             | 0,25             |
| <b>Estufa de circulação e renovação de ar</b>                     | MARCONI                  | não se aplica                               | 2880                  | 2,20             | 105,60           |

**Fonte:** Embrapa Agroenergia.

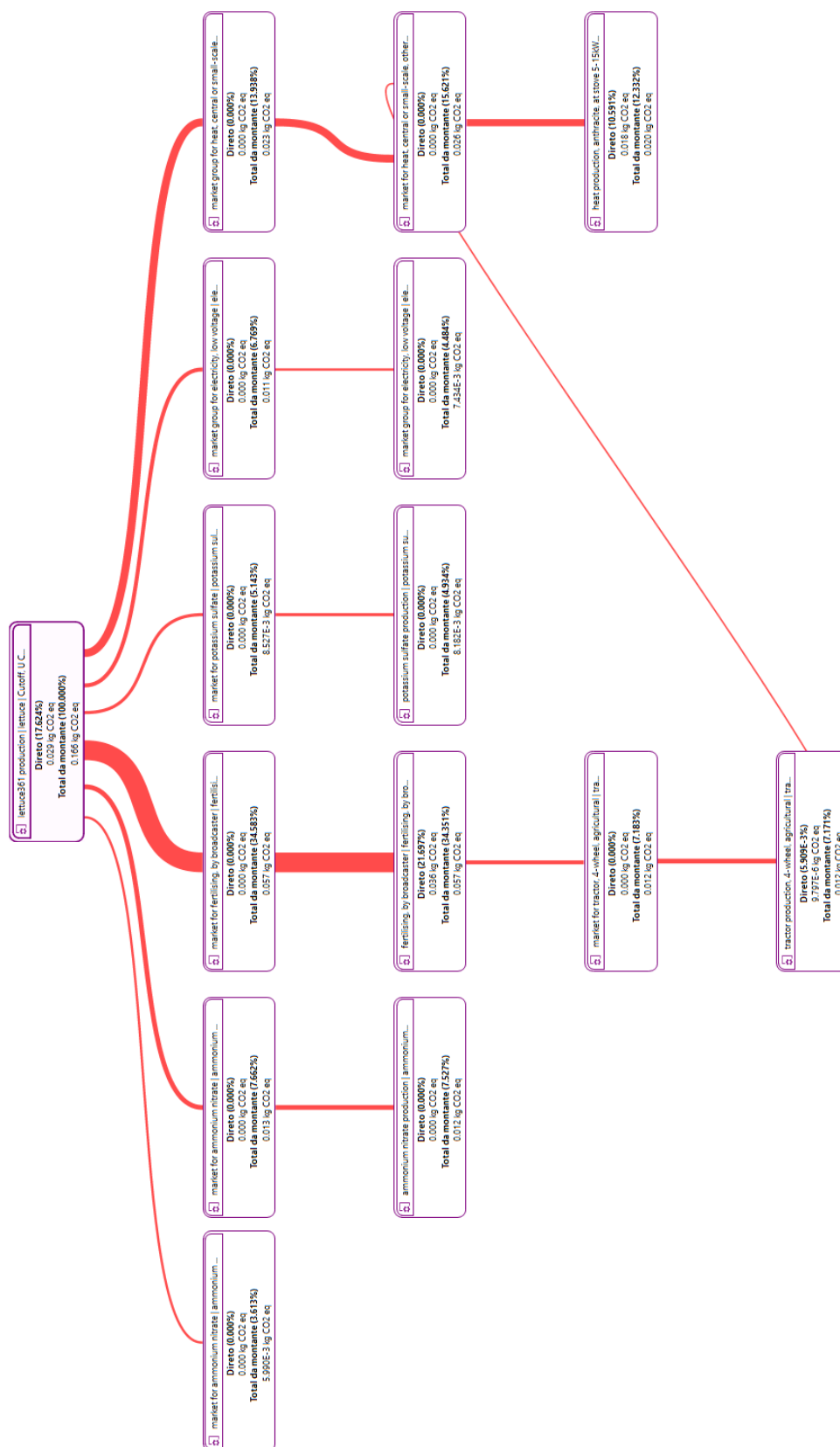
## A6. Gráficos *Sankey* para aquecimento global (*Global warming*)

Figura 27 – Gráficos *Sankey* para aquecimento global da alface sem calcário.



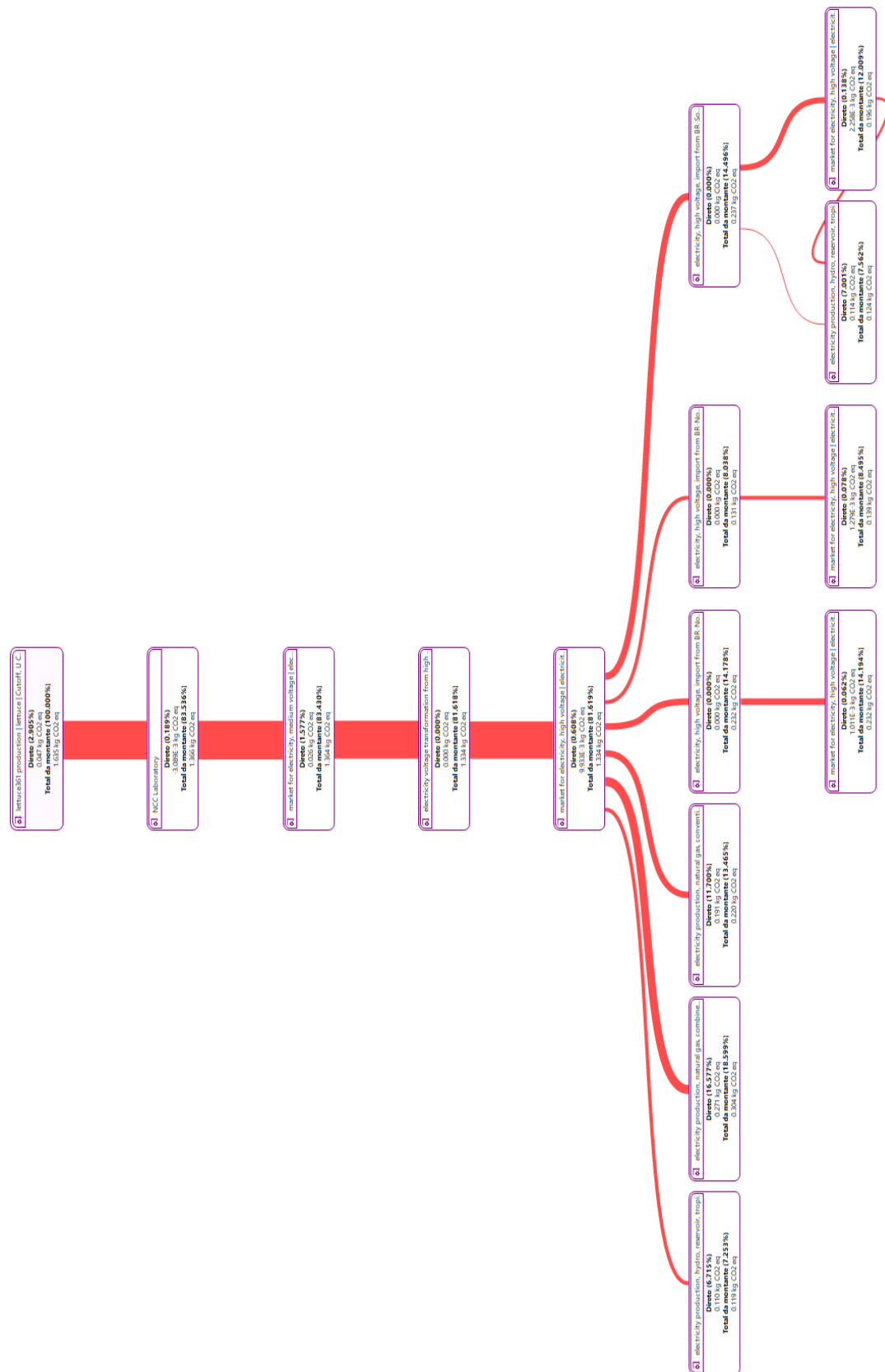
Lettuce361 production | lettuce | Cutoff, U - GLO Sem calcário

**Figura 28** – Gráficos *Sankey* para aquecimento global da alface com calcário.



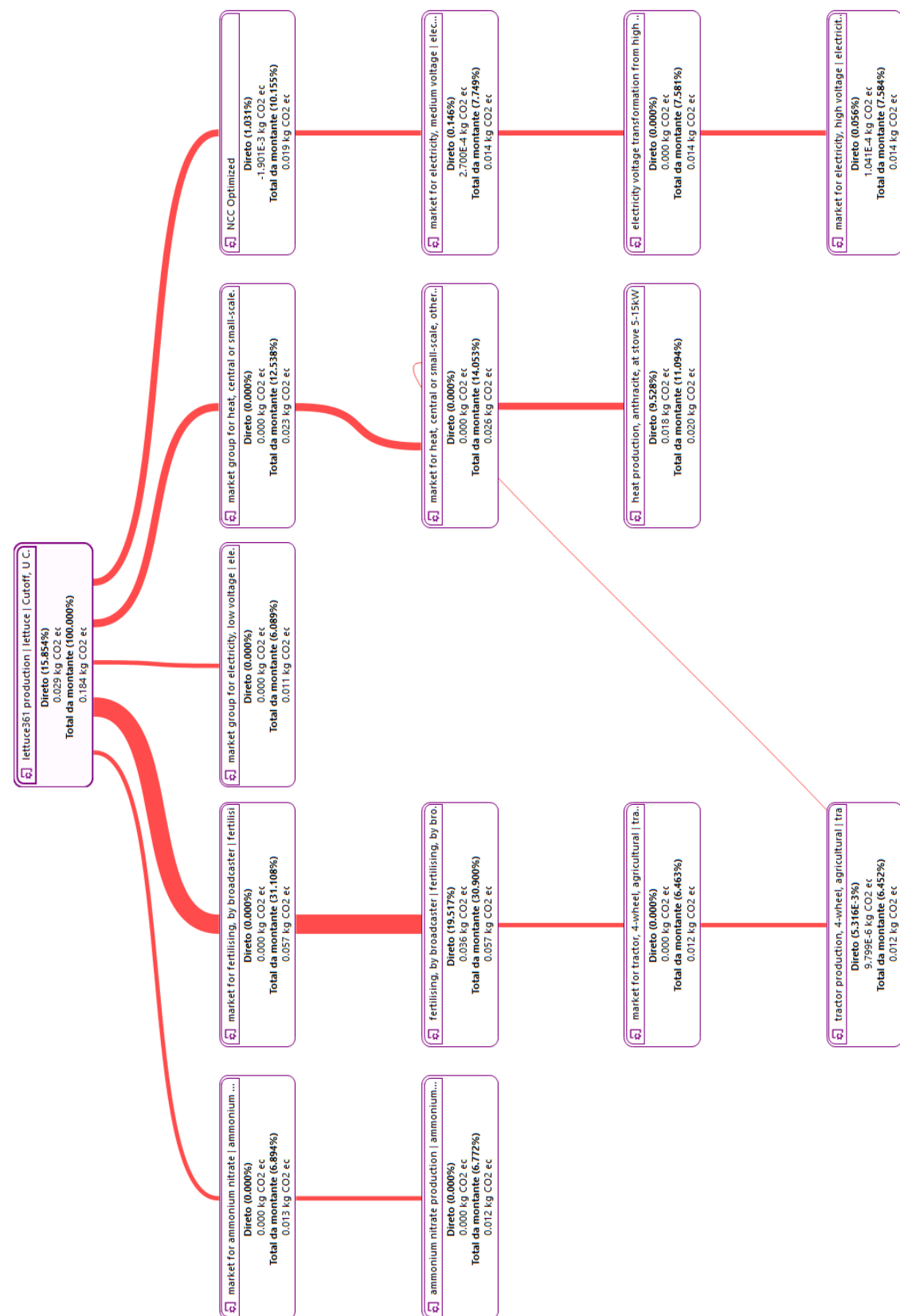
*Lettuce361 production | lettuce | Cutoff, U - GLO com calcário.*

**Figura 29** – Gráficos *Sankey* para aquecimento global da alface com NCCLab.



*Lettuce361 production | lettuce | Cutoff, U - GLO Com NCCLab*

**Figura 30** – Gráficos *Sankey* para aquecimento global da alface com NCCOpt.



*Lettuce361 production | lettuce | Cutoff, U - GLO com NCCOpt.*

## A7. Avaliação qualitativa de incertezas dos principais conjuntos de dados com base na lógica da matriz Pedigree

**Tabela 21** – Avaliação qualitativa de incertezas dos principais conjuntos de dados utilizados na ACV.

| Conjunto de dados                                 | Origem dos dados                           | Incerteza qualitativa |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Produção de NCC escala laboratorial</b>        | Dados primários do projeto Agricarbono     | Baixa                 |
| <b>Produção de NCC otimizada</b>                  | Cenário prospectivo baseado no NCCLab      | Média                 |
| <b>Eletricidade e calor do processo</b>           | Modelagem no openLCA e bases secundárias   | Média                 |
| <b>Produção de cal virgem Ca (OH)<sub>2</sub></b> | Bases secundárias                          | Média                 |
| <b>Sistema agrícola da alface</b>                 | Base integrada ao openLCA                  | Média a alta          |
| <b>Sistema agrícola da soja</b>                   | Base integrada ao openLCA                  | Média                 |
| <b>Emissões do solo</b>                           | Literatura e fatores médios                | Média a alta          |
| <b>Carbono biogênico na biomassa</b>              | Dados experimentais e fatores de conversão | Média                 |
| <b>Carbono orgânico do solo</b>                   | Cenários exploratórios                     | Alta                  |
| <b>Créditos de carbono</b>                        | Relatórios e referências de mercado        | Média a alta          |

**Fonte:** Elaboração própria, com base nos dados primários do projeto Agricarbono, nos inventários modelados no openLCA e em bases secundárias utilizadas no estudo.

**Nota:** A avaliação qualitativa de incertezas foi elaborada com base na lógica da matriz Pedigree, considerando cinco dimensões principais: confiabilidade da fonte, representatividade temporal, representatividade geográfica, representatividade tecnológica e completude do inventário. Essa apreciação não substitui uma análise estatística formal de incerteza, mas permite qualificar a robustez relativa dos principais conjuntos de dados utilizados na tese.

Capítulo aceito para publicação na segunda edição do livro [Sustainable Agrochemistry: A Compendium of Technologies | Springer Nature Link](#) (Springer Nature, 2026).

Advertisement

Nature Communications

Considering Nature Communications for your next manuscript?

SPRINGER NATURE Link

Log in

Find a journal Publish with us Track your research Search

Saved research Cart

Home > Book



Sustainable Agrochemistry

A Compendium of Technologies

Book | Apr 2026

Latest edition

Accessibility Information

Overview

Editors: [Silvio Vaz Jr.](#)

- Provides a concise introduction to sustainable agrochemistry for a professional audience
- Identifies the main scientific and technological approaches that can be applied to modern agrochemistry
- Discusses available technologies for reducing the negative impacts of agrochemicals on the environment and human health

About this book

This second edition expands on the foundational concepts of the first edition by incorporating cutting-edge research and emerging technologies for sustainable agriculture. In addition to updated chapters on green chemistry, toxicology, and agrochemical synthesis, it introduces new topics such as life cycle assessment of agrochemicals, photodegradation studies of lign-based nanoformulations, pH-dependent sorption modeling for herbicides, and innovative approaches to sustainable fertilizers. With contributions from leading experts, this edition offers a comprehensive and forward-looking perspective on minimizing environmental impact while enhancing agricultural productivity.

Explore related subjects

Discover the latest articles, books and news in related subjects.

[Agroecology](#) [Green Chemistry](#) [Waste Management/Waste Technology](#)

Editors and Affiliations

**National Research Center for Agroenergy, Brazilian Agricultural Research Corporation, Brasília, Brazil**

Silvio Vaz Jr.

About the editor

Dr. Silvio Vaz Jr. holds a B.Sc. in Chemistry with technological assignments (applied chemistry) from the Federal University of Uberlândia (Brazil), a M.Sc. in Physical Chemistry and a D.Sc. in Analytical Chemistry from the University of São Paulo, and PhD equivalence diplomas from the University of Coimbra (Portugal) and from University of Granada (Spain). He was the founder and managing partner of two chemical analysis and consulting companies (Solução Ambiental and Hidrolis, Brazil). He is currently a senior scientist at Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa, Brazil). He has experience in several areas of Chemistry, working on the following topics: analytical & environmental chemistry; renewable chemistry; green chemistry; agricultural chemistry; and technological/industrial chemistry. He is coordinator of R&D&I projects nationally and internationally. He is author, co-author and editor of articles, books and chapters, and patents. He is past president of the ACS-Brazil Chapter of the American Chemical Society. He is the leader of the Embrapa/CNPq research group in renewable chemistry. He is the winner of two editions of the Kurt Pritzker Prize of the Brazilian Chemical Industry Association (new enterprise category 2008 and researcher 2011 category). He is a member of the Carbon Pricing Leadership Coalition of the World Bank. He serves as professor of the graduate program in Environmental Engineering at Federal University of Ouro Preto, Brazil, and of the graduate programme in Biofuels (Federal University of Uberlândia, Brazil); he serves also as collaborator of the graduate program in Chemical and Biochemical Process Engineering (Federal University of Rio de Janeiro, Brazil) and of the graduate program in Materials Science (University of Brasília). Recently, Dr. Vaz Jr. received the Talents 2024 award from the Federal Chemistry Council (Brazil) as winner of the Industrial Chemistry/Technological Chemistry category and Springer Nature Editor of Distinction Award 2025.

Accessibility Information

PDF accessibility summary

This PDF has been created in accordance with the PDF/UA-1 standard to enhance accessibility, including screen reader support, described non-text content (images, graphs), bookmarks for easy navigation, keyboard-friendly links and forms and searchable, selectable text. We recognize the importance of accessibility, and we welcome queries about accessibility for any of our products. If you have a question or an access need, please get in touch with us at [accessibilitysupport@springernature.com](mailto:accessibilitysupport@springernature.com). Please note that a more accessible version of this eBook is available as ePub.

EPUB accessibility summary

This eBook is designed with accessibility in mind, aiming to meet the ePub Accessibility 1.0 AA and WCAG 2.2 Level AA standards. It features a navigable table of contents, structured headings, and alternative text for images, ensuring smooth, intuitive navigation and comprehension. The text is reflowable and resizable, with sufficient contrast. We recognize the importance of accessibility, and we welcome queries about accessibility for any of our products. If you have a question or an access need, please get in touch with us at [accessibilitysupport@springernature.com](mailto:accessibilitysupport@springernature.com).

Bibliographic Information

|                           |                                                                      |                                                                                                                 |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Book Title                | Book Subtitle                                                        | Editors                                                                                                         |
| Sustainable Agrochemistry | A Compendium of Technologies                                         | Silvio Vaz Jr.                                                                                                  |
| Publisher                 | eBook Packages                                                       | Copyright information                                                                                           |
| Springer Cham             | Chemistry and Materials Science, Chemistry and Material Science (R0) | The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2026 |
| Hardcover ISBN            | Softcover ISBN                                                       | eBook ISBN                                                                                                      |
| 978-3-032-16471-1         | 978-3-032-16474-2                                                    | 978-3-032-16472-8                                                                                               |
| Due: 11 May 2026          | Due: 11 May 2027                                                     | Due: 14 April 2026                                                                                              |
| Edition Number            | Number of Pages                                                      | Number of Illustrations                                                                                         |
| 2                         | IV, 531                                                              | 104 b/w Illustrations, 99 Illustrations in colour                                                               |

Sections

Overview

About this book

Editors and Affiliations

About the editor

Accessibility information

Bibliographic information

Publish with us

Keywords

Natural Pesticides

Agrochemical residues

Crop protection chemistry

Residue management

Ecological Risk Assessment

Soil Improvement

Crop Monitoring

Integrated Pest Management

## Metadata of the chapter that will be visualized online

|                      |                                                                                                       |                                                                    |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Chapter Title        | Life Cycle Assessment of a Nanocorrective/Nanofertilizer Obtained from Carbon Capture and Use Process |                                                                    |
| Copyright Year       | 2026                                                                                                  |                                                                    |
| Copyright Holder     | The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG                              |                                                                    |
| Author               | Family Name                                                                                           | <b>Miers</b>                                                       |
|                      | Particle                                                                                              |                                                                    |
|                      | Given Name                                                                                            | <b>Dieter</b>                                                      |
|                      | Suffix                                                                                                |                                                                    |
|                      | Division                                                                                              |                                                                    |
|                      | Organization/University                                                                               | DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. |
|                      | Address                                                                                               | Frankfurt am Main, Germany                                         |
|                      | Division                                                                                              | Graduate Program in Biofuels, Institute of Chemistry               |
|                      | Organization/University                                                                               | Federal University of Uberlândia                                   |
|                      | Address                                                                                               | Uberlândia, MG, Brazil                                             |
| Corresponding Author | Family Name                                                                                           | <b>Vaz</b>                                                         |
|                      | Particle                                                                                              |                                                                    |
|                      | Given Name                                                                                            | <b>Silvio</b>                                                      |
|                      | Suffix                                                                                                | <b>Jr</b>                                                          |
|                      | Division                                                                                              | Graduate Program in Biofuels, Institute of Chemistry               |
|                      | Organization/University                                                                               | Federal University of Uberlândia                                   |
|                      | Address                                                                                               | Uberlândia, MG, Brazil                                             |
|                      | Division                                                                                              |                                                                    |
|                      | Organization/University                                                                               | Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA)              |
|                      | Address                                                                                               | Brasília, DF, Brazil                                               |
| Author               | Email                                                                                                 | silvio.vaz@embrapa.br                                              |
|                      | Family Name                                                                                           | <b>Souza</b>                                                       |
|                      | Particle                                                                                              | <b>de</b>                                                          |
|                      | Given Name                                                                                            | <b>Daniela Tatiane</b>                                             |
|                      | Suffix                                                                                                |                                                                    |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                       |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Author                        | Division                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                       |
|                               | Organization/University                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) |
|                               | Address                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brasília, DF, Brazil                                  |
|                               | Family Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Gravina</b>                                        |
|                               | Particle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                       |
|                               | Given Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Érica</b>                                          |
|                               | Suffix                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                       |
|                               | Division                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                       |
|                               | Organization/University                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) |
|                               | Address                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brasília, DF, Brazil                                  |
| Author                        | Family Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>Lima</b>                                           |
|                               | Particle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                       |
|                               | Given Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>Carlos Eduardo Pacheco</b>                         |
|                               | Suffix                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                       |
|                               | Division                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                       |
|                               | Organization/University                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) |
| Abstract                      | Address                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Brasília, DF, Brazil                                  |
|                               | <p>This study investigates the potential of nano-calcium carbonate (NCC) to reduce the CO<sub>2</sub> footprint from energy generation and explores its applicability in agriculture. The synthesis of NCC from captured CO<sub>2</sub> was examined, including its effectiveness as an additive to improve material efficiency, and its use in mitigating emissions. Life cycle assessment (LCA) using OpenLCA software was performed to evaluate the environmental impacts of NCC production from CO<sub>2</sub> emissions in thermoelectric plants, focusing on the cradle-to-gate approach. The synthesized product showed excellent neutralization power, favorable particle size (&lt;100 nm), and potential application as a soil amendment—or nanocorrective—and nanofertilizer. The LCA results revealed a significant reduction in carbon footprint, aligning with sustainable agricultural goals. NCC presents opportunities for regions lacking natural limestone, contributing to improved soil quality and promoting low-carbon practices. Thus, this study emphasizes NCC as a dual-impact innovation: reducing atmospheric CO<sub>2</sub> through carbon capture and use (CCU), enhancing agricultural productivity. It supports the transition to a zero-carbon economy and aligns with global climate and sustainability goals.</p> |                                                       |
| Keywords (separated by “ - ”) | Climate change - CO <sub>2</sub> - Nanocarbonate - Greenhouse gases - Mitigation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                       |

# Life Cycle Assessment of a Nanocorrective/ Nanofertilizer Obtained from Carbon Capture and Use Process

Dieter Miers, Silvio Vaz Jr, Daniela Tatiane de Souza, Érica Gravina,  
and Carlos Eduardo Pacheco Lima

**Abstract** This study investigates the potential of nano-calcium carbonate (NCC) to reduce the CO<sub>2</sub> footprint from energy generation and explores its applicability in agriculture. The synthesis of NCC from captured CO<sub>2</sub> was examined, including its effectiveness as an additive to improve material efficiency, and its use in mitigating emissions. Life cycle assessment (LCA) using OpenLCA software was performed to evaluate the environmental impacts of NCC production from CO<sub>2</sub> emissions in thermoelectric plants, focusing on the cradle-to-gate approach. The synthesized product showed excellent neutralization power, favorable particle size (<100 nm), and potential application as a soil amendment—or nanocorrective—and nanofertilizer. The LCA results revealed a significant reduction in carbon footprint, aligning with sustainable agricultural goals. NCC presents opportunities for regions lacking natural limestone, contributing to improved soil quality and promoting low-carbon practices. Thus, this study emphasizes NCC as a dual-impact innovation: reducing atmospheric CO<sub>2</sub> through carbon capture and use (CCU), enhancing agricultural productivity. It supports the transition to a zero-carbon economy and aligns with global climate and sustainability goals.

**Keywords** Climate change · CO<sub>2</sub> · Nanocarbonate · Greenhouse gases · Mitigation

D. Miers  
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,  
Frankfurt am Main, Germany

AU1 Graduate Program in Biofuels, Institute of Chemistry, Federal University of Uberlândia,  
Uberlândia, MG, Brazil

S. Vaz Jr (✉)  
Graduate Program in Biofuels, Institute of Chemistry, Federal University of Uberlândia,  
Uberlândia, MG, Brazil

Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Brasília, DF, Brazil  
e-mail: [silvio.vaz@embrapa.br](mailto:silvio.vaz@embrapa.br)

D. T. de Souza · É. Gravina · C. E. P. Lima  
Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Brasília, DF, Brazil

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature  
Switzerland AG 2026

S. Vaz Jr. (ed.), *Sustainable Agrochemistry*,  
[https://doi.org/10.1007/978-3-032-16472-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-032-16472-8_13)

## Abbreviations

|      |                                                            |
|------|------------------------------------------------------------|
| BET  | Brunauer–Emmett–Teller method                              |
| CCS  | Carbon capture and storage                                 |
| CCU  | Carbon capture and use                                     |
| CCUS | Carbon capture, use and storage                            |
| DTC  | Determined technical coefficient                           |
| EDX  | Energy-disperse X-ray spectroscopy                         |
| GHGs | Greenhouse gases                                           |
| GWP  | Global warming potential                                   |
| GTP  | Global temperature potential                               |
| LCA  | Life cycle analysis                                        |
| LCI  | Life cycle inventory                                       |
| LCIA | Life cycle inventory analysis                              |
| NCC  | Nano-calcium carbonate or nano- $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ |
| NP   | Neutralization power                                       |
| RTC  | Reference technical coefficient                            |
| SDGs | Sustainable development goals                              |
| SEM  | Scanning electron microscopy                               |
| TRL  | Technology readiness level                                 |
| TRNP | Total relative neutralization power                        |
| XRD  | X-ray diffraction spectroscopy                             |

## 1 Introduction

Mineral coal originates from the fossilization of plant material in sedimentary basins and remains a predominant energy source in several countries, including Brazil (Albert et al. 2022). Coal is formed over time as the plant matter is compacted and bacteria act on it, along with pressure and heat. This process occurs worldwide, particularly in regions with a low temperature or temperate climate (Guio 2021). AU2

The main constituent that forms coal is wood, starting with a composition of approximately 50% C, 44% O, 5% H, and 1% w/w other compounds (Branco 2014). Thus, coal is composed primarily of carbon.

To produce coal and upgrade its quality, coal mining inevitably generates large volumes of low-heating-value waste, including coal gangue, waste coal, and coal washery rejects, which are dumped near mine sites. The coal mining wastes and coal processing by-products account for roughly 10–20% of the raw coal production by mass, although this can vary significantly from region to region and from mine to mine (Liu et al. 2010). The large amounts of accumulated coal mining wastes and coal processing by-products, in addition to occupying vast land areas, cause water pollution, soil contamination, and soil erosion. These also result in vegetation loss and air pollution alongside  $\text{CO}_2$  emissions that contribute to global warming and climate change, along with other environmental problems (Cheng et al. 2024). Conventional extraction and use of coal has led to significant AU3  
AU4

- environmental degradation (Yang 2024). The reliance on fossil fuels like coal in thermoelectric plants depletes finite resources and significantly increases greenhouse gas emissions (Rodrigues 2022).
- In combustion processes in thermoelectric power plants, various solid, gaseous, and liquid pollutants are produced, which significantly impact the environment. These gaseous pollutants include sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), which contribute to acid rain formation and respiratory problems (Khalaf et al. 2024). They are released directly into the atmosphere during coal combustion. SO<sub>2</sub> is one of the most important gaseous air pollutants and the chemical index of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>). SO<sub>2</sub> is one of the six criteria pollutants in the air quality index (AQI).
- Recently, there has been a movement to exclude fossil fuels from the energy matrix as they are a major cause of the climate crisis, through exhaust emissions such as CO<sub>2</sub> during coal-fired power generation—Guinea et al. (2024) observed this issue. Furthermore, Arezki et al. (2017) suggested that news and changes in expectations drive fluctuations in energy markets.
- In the realm of global environmental economics, the confluence of macroeconomic forces and ecological impacts has garnered increasing attention, signaling a pivotal shift in the way economic and environmental policies are conceived and implemented. The recent global economic crisis, marked by high inflation rates, has unfolded concurrently with a significant rise in greenhouse gas (GHG) emissions (Ahmad 2023).
- The 2024 BP *Statistical Review of World Energy* reports that coal continues to be a major contributor to global primary energy consumption, comprising approximately 26.45% of the total and ranking second only to oil (BP Global 2024). For more than a century, coal has been a cornerstone of global power generation, and its dominance is likely to continue to persist because of high availability and cost-effectiveness (Qi et al. 2016). Notably, global coal-fired electricity generation reached unprecedented levels for the second consecutive year in 2022, resulting in record-high CO<sub>2</sub> emissions from these power plants, which now account for more than one-third of total electricity generation (International Energy Agency 2023).
- Russia's invasion of Ukraine in 2022 profoundly impacted coal trade dynamics, price levels, and supply–demand patterns. The sharp rise in fossil fuel prices, particularly natural gas, triggered a shift toward more economically viable alternatives, including coal, in certain regions. The escalation in coal prices, coupled with the rapid deployment of renewable energy sources, advances in energy efficiency, and a slowdown in global economic growth, has moderated the overall increase in coal demand (International Energy Agency 2023).
- Given these developments, reducing carbon emissions from coal-fired power plants has become a critical public concern. Although technological advancements such as carbon capture and use (CCU) and carbon capture and storage (CCS) offer substantial potential for reducing emissions, their current high costs present significant challenges (Xu et al. 2022; Vaz Jr et al. 2022). An alternative and more cost-effective approach involve utilizing CO<sub>2</sub> emissions from coal combustion to produce nanofertilizers, which is expected to enhance food production efficiency.
- The CCU processes involve the separation of CO<sub>2</sub> from other gases emitted during the combustion of fossil fuels, including coal and natural gas, or from industrial

processes in steel mills, refineries, cement plants, and fertilizer facilities (Küller 2024). CCU and CCS are recognized as promising solutions for mitigating CO<sub>2</sub> emissions, with three primary methods: (i) post-combustion, (ii) pre-combustion, and (iii) oxy-fuel combustion. Of these, post-combustion capture is predominantly employed in thermal power plants and industrial sectors, all of which contribute significantly to global CO<sub>2</sub> emissions (Maniarasu et al. 2023). For CCS, once captured, the CO<sub>2</sub> is compressed into a liquid state and transported to appropriate storage sites, typically underground in depleted oil and gas reservoirs, abandoned coal mines, or porous rock formations (Heidarabad and Shin 2024).

AU8

AU9

CCU comprises a set of technology for mitigating greenhouse gas emissions, with different methods that vary in efficiency and applicability. Among the main methods are afterburner capture, where CO<sub>2</sub> is separated from exhaust gases after burning fossil fuels, usually using solvents such as amines (Madejski et al. 2022). Besides capture, the industrial use of CO<sub>2</sub> as a feedstock faces non-technical barriers, including regulatory gaps and insufficient public policy incentives. Recent studies have indicated the potential of CO<sub>2</sub> for use in applications such as synthetic fuels, fertilizers, construction materials, and mineralization (Kumar et al. 2021).

Although widely applied in industrial plants, post-combustion carbon capture using amine solvents presents significant energy demands for solvent regeneration, accounting for up to 30% of the total plant energy consumption (Madejski et al. 2022). Pre-combustion capture involves converting the fuel into a mixture of CO and H<sub>2</sub>, with the CO<sub>2</sub> being removed prior to combustion. While this is an efficient technique, it is only suitable for new installations. Oxycombustion, on the other hand, uses pure oxygen instead of air, resulting in exhaust gases with a higher concentration of CO<sub>2</sub>, facilitating capture, although the costs associated with separating oxygen are high (Alalwan and Alminshid 2021).

Other CCU/CCS methods include the use of solid adsorbents, such as zeolites or activated carbon, which capture CO<sub>2</sub> on porous surfaces and selective membranes, which separate CO<sub>2</sub> from other gases based on permeability. Both methods are promising but still need significant advances to be economically viable on a commercial scale (Chao et al. 2021).

AU10

Recent advances in low-energy catalytic processes, particularly those driven by coordination chemistry, have demonstrated great potential in improving the energy efficiency of CCU technologies (Osman et al. 2024). These innovations directly support the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs), notably Sustainable Development Goal 12 (responsible consumption and production), Sustainable Development Goal 13 (climate action), and Sustainable Development Goal 9 (industry, innovation, and infrastructure) (United Nations 2025). In the context of this study, the use of captured CO<sub>2</sub> as a feedstock for calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) synthesis—at nanoscale—from industrial waste exemplifies a practical application of the circular economy and industrial symbiosis (Oughton et al. 2022). This establishes a clear connection between emission mitigation, waste valorization, and innovation in materials for sustainable agriculture.

This study explores the potential of nano-CaCO<sub>3</sub> (NCC) to mitigate the CO<sub>2</sub> footprint associated with coal use and its applicability in agriculture. NCC is a material that, when used as an additive, can enhance the efficiency of various materials and

industrial processes while reducing CO<sub>2</sub> emissions through CCUS. The study focuses on several key areas: the production methods of NCC, its effectiveness as an additive for improving industrial efficiency, and its potential to reduce CO<sub>2</sub> emissions. Additionally, the potential applications of NCC in agriculture are examined, particularly its ability to improve resource use efficiency and capture CO<sub>2</sub> in the soil. It should be noted that this study does not promote coal mining itself but rather proposes a value-added reuse of CO<sub>2</sub> emissions from existing thermoelectric facilities, aligning with mitigation strategies during the energy transition period.

For an agricultural case study, lettuce (*Lactuca sativa*) was selected because it has a simple and standardized biological model for many studies. Its life cycle is relatively short, allowing the experimental results to arise quickly. This facilitates the evaluation of different experimental variables in a relatively short period (Fonseca et al. 2024). Another favorable characteristic of lettuce is that it is easy to handle and grow under controlled conditions, such as in greenhouses or laboratories, which allows researchers to maintain a uniform environment to test fertilizers, pesticides, and bio stimulants, among other agricultural inputs (Burgess et al. 2024). This makes it an excellent indicator plant (bioindicator). Small changes in the environment or applied inputs can be easily observed in the plant's morphology (size, color, leaf texture, etc.), allowing researchers to accurately assess the impact of different products and growing conditions (Tupajić et al. 2024).

To comprehensively assess the potential benefits of the applied CCU approach, a life cycle assessment (LCA) was conducted using the OpenLCA software. This assessment covers the entire process, from CO<sub>2</sub> capture (*cradle*) to the production of NCC (*gate*), with a particular focus on estimating the environmental impacts, especially the carbon footprint, using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) methodology (IPCC 2013). The hypothesis of this study is that NCC, synthesized using CO<sub>2</sub> captured from thermoelectric emissions, can serve as an effective soil amendment while contributing to greenhouse gas (GHG) mitigation within a circular economy framework.

## 2 Materials and Methods

### 2.1 Process of Obtaining Nanocarbonate from a Gas Mixture

The nanocarbonates used in this study were synthesized from CO<sub>2</sub> emissions originating from thermoelectric power plants. It is expected that this approach can also be adapted to CO<sub>2</sub> generated as a byproduct in sugarcane ethanol production.

A synthesis process (Fig. 1) for precipitated NCC—referred to as nanocorrective/nanofertilizer—was developed at a technology readiness level (TRL) of 5. It employed a gas mixture composed of 81% N<sub>2</sub>, 11% O<sub>2</sub>, and 8% CO<sub>2</sub> (v/v) (White-Martins), replicating the typical flue gas emissions from the chimney of Eletrobras CGTEE (Candiota, RS, Brazil), an electricity company. This synthesis process encompasses Stage 1 of the nanocorrective production system, focusing on the transformation of captured CO<sub>2</sub> into a usable agricultural input. The synthesis of

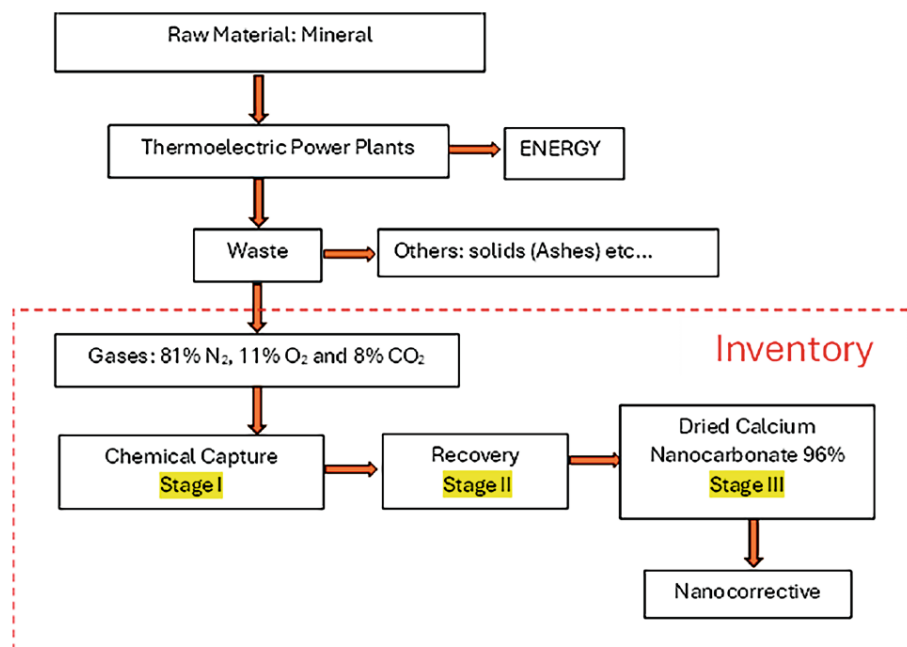


**Fig. 1** Overview of coal mining to nanocarbonate obtained from CO<sub>2</sub>. The red line defines the boundary system used in the life cycle assessment (LCA)

NCC was carried out using calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) (Sigma-Aldrich), deionized water, and the gas mixture previously introduced here. The calcium hydroxide (100.44 g) was dissolved in 9.905 g of deionized water in a reactor with constant mechanical stirring. The gas mixture was introduced into the system at a flow rate of 20 L min<sup>-1</sup> over a period of 10 min, totaling 200 L of gas processed.

Emissions from thermoelectric plants were simulated using a standardized gas mixture to replicate real capture conditions. This allowed a practical evaluation of the efficiency of the CCU process applied in a typical industrial scenario.

Figure 2 summarizes precursors, equipment, and process steps for NCC synthesis in a 10 L Bioflo 120 jacketed bioreactor (Eppendorf) at temperature-controlled, constant stirring, and pH monitoring conditions. First, “Solution 1” was prepared by dissolving 100.44 g of Ca(OH)<sub>2</sub> (Sigma-Aldrich) in distilled water to a total of 10 L (1% w/w). CO<sub>2</sub> was then introduced to precipitate calcium carbonate under controlled pH and temperature conditions.

The process was conducted in two main stages. In the first stage, “Solution 1” was added to the bioreactor, where the temperature was maintained at 53.5 °C, with controlled agitation of 800 rpm for a period of 40 min. The initial pH of this stage was 12. During this period, standard buffer solutions (SpecSol) of pH values of 7 and 9 were used for calibration and precise control of the pH, both were maintained with an accuracy of ±0.02 at 25 °C.

In the second step, the synthesis of NCC particles was carried out at a temperature of 25 °C, with the stirring increased to 1000 rpm, and a process duration of

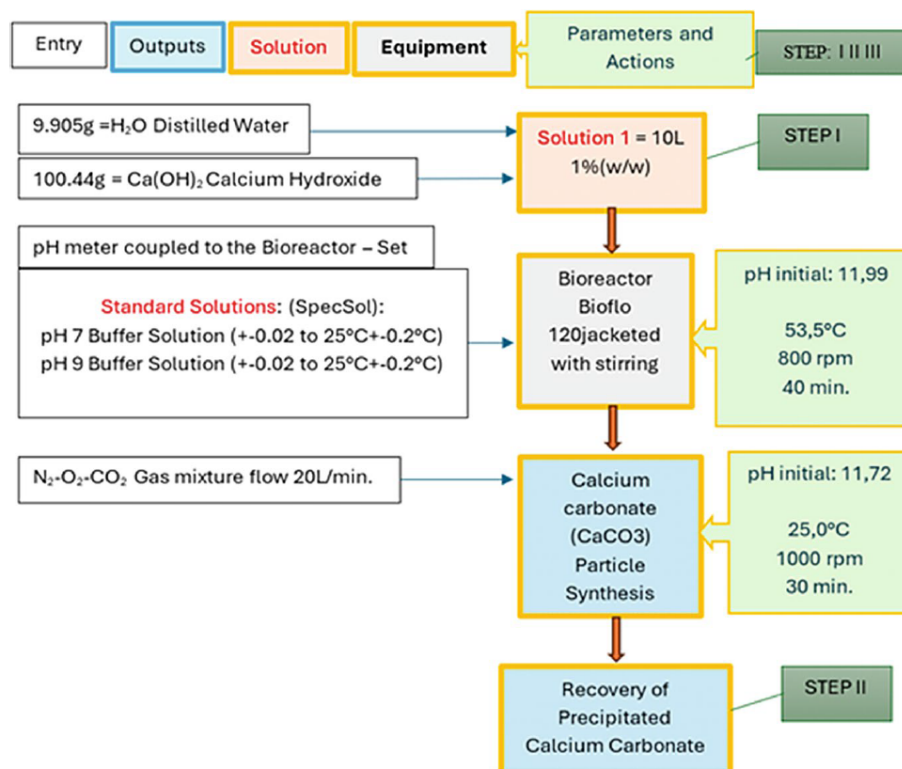


**Fig. 2** Step 1: chemical capture of CO<sub>2</sub> to generate NCC

30 min. The initial pH value of this stage was 11.7. During the whole process, a flow of 20 L min<sup>-1</sup> of a gaseous mixture of N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> was introduced to promote the precipitation of NCC particles.

At the end of the process, the precipitated NCC was recovered and collected for further analysis. The methodology was conducted in three consecutive stages, with the parameters of pH, temperature, and agitation continuously monitored, aiming to optimize the formation of calcium carbonate nanoparticles.

## 2.2 Characterization of Nanocarbonate Particles and Evaluation of Technical Performance of Nanocarbonate Particles

In Step 3, the precipitated NCC with 135.64 g of CaCO<sub>3</sub>, obtained after drying, was characterized using different analytical methods to assess the resulting physico-chemical properties. The characterization methods were divided into specific (for soil acidity correction) and general (for NCC). The product obtained must comply with standards and technical specifications.

For soil acidity correction, chemical analysis was used to determine the concentrations of carbonate, calcium oxides, and magnesium oxides, with the sum of CaO and MgO required to be at least 38% w/w. Particle size analysis was conducted by evaluating the percentage of particles passing through sieves #10 (100%), #20 (minimum 70%), and #50 (minimum 50%). The determination of neutralization power (NP) was evaluated against the minimum value of 67% equivalent in  $\text{CaCO}_3$ . For the determination of total relative neutralization power (TRNP), the minimum accepted value according to the standards for commercialization and field use is 45%. These analytical parameters are derived from the Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2023) compendium of analytical methods for fertilizers, soil correctives, soil conditioners, etc.

After the characterization of the NCC particles, the precipitated NCC was recovered (Fig. 3). This stage included filtration, drying, and collection of the final product, highlighting the operational conditions applied to ensure the quality of the obtained NCC. The levels of cadmium, lead, and silicon were evaluated to determine the inorganic contaminants.

The crystalline phase was identified by X-ray diffraction (XRD), which provides information on crystal structure, crystallite size, lattice deformation, preferred orientation, and layer thickness in a non-destructive manner (Malvern Panalytical 2025). For XRD analysis, the NCC samples were prepared at the nanoscale using chemical precipitation or solution synthesis methods. Care was taken to ensure that the samples were dry and finely pulverized to ensure homogeneous dispersion. Subsequently, each sample was placed in a sample holder, typically made of aluminum or stainless steel, and spread evenly to avoid aggregation. An X-ray diffractometer (Rigaku) with  $\text{CuK}\alpha$  radiation, 35 kV, 15 mA, was utilized for identification of crystalline phases, operating from  $4^\circ$  to  $60^\circ$   $2\theta$  with a scanning speed of  $1^\circ \text{ min}^{-1}$  and step size of  $0.1^\circ$ . Match! 3.8.1.143 phase identification from powder diffraction software (Crystal Impact) was used for indexing XRD data in addition to Full Prof software, version July 2017.

Surface morphology and particle size were then examined by high-resolution scanning electron microscopy (SEM) on a Zeiss Sigma HV (Carl Zeiss). Samples were sprinkled onto conductive carbon tape, metalized with a 12 nm gold layer, and imaged at 5 kV using the in-lens detector. At least 100 particles per sample were measured directly from the SEM micrographs using ImageJ (NIH) to obtain a statistically robust size distribution.

Chemical composition was analyzed via energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) in the SEM, and specific surface area and porosity were determined by multilayer adsorption using the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method.

Greenhouse trials were conducted to validate the performance of the NCC particle as a soil nanocorrective/nanofertilizer, in accordance with the technical normative of the Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2006) for this type of agrochemicals.

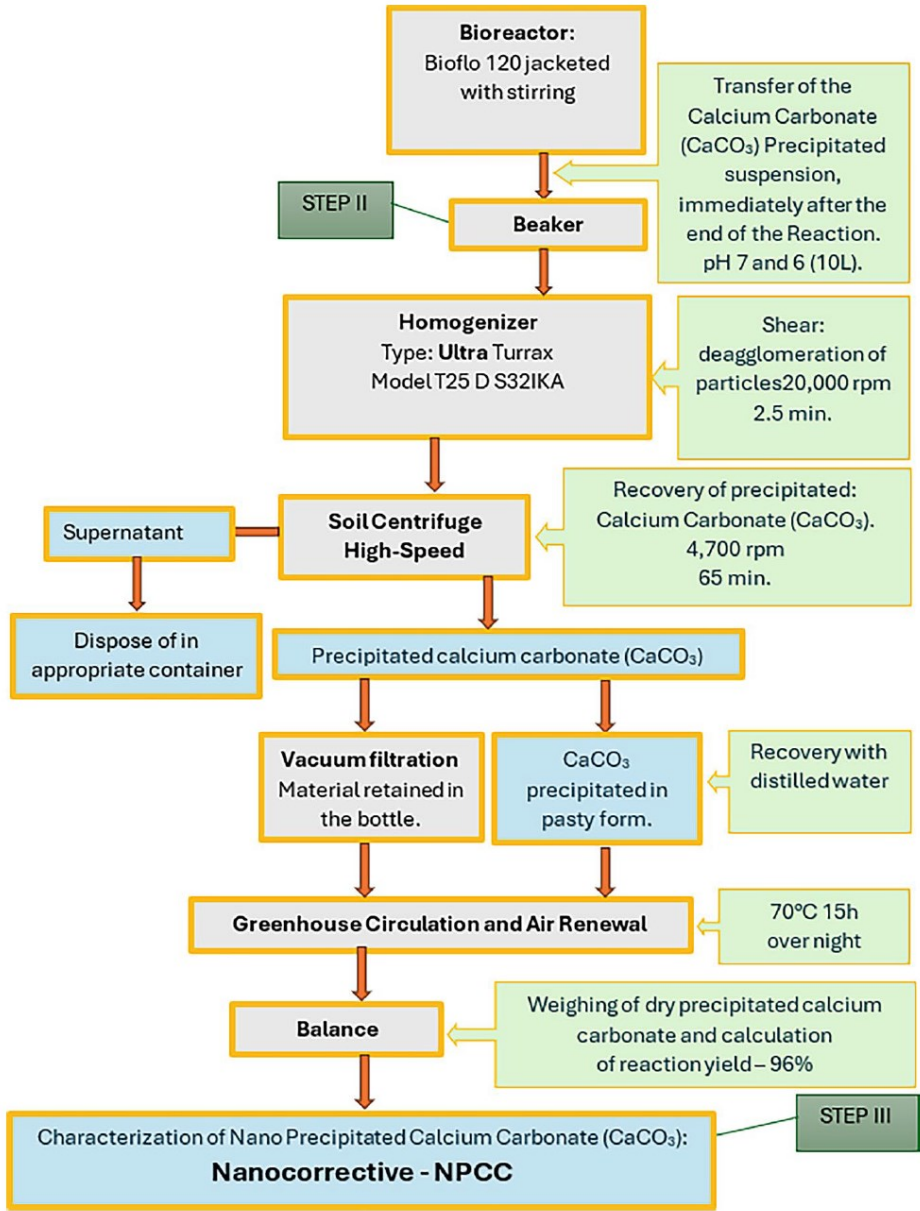


Fig. 3 Step 2: recovery of the precipitated NCC

2.3 Greenhouse Trials for Nanocorrective/  
Nanofertilizer Application

278  
279

Greenhouse validation of NCC as a nanocorrective was performed using lettuce 280  
(*Lactuca sativa*). Lettuce was planted in pots distributed in lots (L), Control (C), and 281

282 Dose (D) at a greenhouse facility (Fig. 4). Plants were harvested and weighed on  
 283 08.07.2022 (wet weight), at 3 days after cutting, and at 7 days after again to estimate  
 284 total dry weight.

285 The applied experimental design was:

- 286 • Treatment 1 (T1): Without lime and with NPK fertilizer (25 pots); batch A; NCC  
 287 dosage of 1.0 g L<sup>-1</sup>;
- 288 • Treatment 2 (T2): Without lime and with NPK fertilizer (25 pots); batch B; NCC  
 289 dosage of 1.0 g L<sup>-1</sup>;
- 290 • Treatment 3 (T3): Without lime and with NPK fertilizer (11 pots); batch C; NCC  
 291 dosage of 2.5 g L<sup>-1</sup>;
- 292 • Treatment 4 (T4): Without lime and with NPK fertilizer (5 pots); batch D; NCC  
 293 dosage of 5.0 g L<sup>-1</sup>;
- 294 • Treatment 5 (T5): Without lime and with NPK fertilizer (5 pots); batch E; NCC  
 295 dosage of 5.0 g L<sup>-1</sup>;
- 296 • Control 1 (C1): With limestone and with fertilizer (5 pots);
- 297 • Control 2 (C2): Without limestone and with fertilizer (5 pots);
- 298 • Control 3 (C3): With limestone and without fertilizer (5 pots);
- 299 • Control 4 (C4): Without limestone and without fertilizer (5 pots).

## 300 2.4 Life Cycle Assessment Approach

301 The “cradle-to-gate” system boundary (Fig. 5) focuses on life cycle analysis (LCA)  
 302 of a product from the beginning of its manufacturing (or resource extraction) to the  
 303 point where the product leaves the factory (or “gate”).

304 This model considers all production phases, including raw material extraction,  
 305 processing, manufacturing, and transportation to the factory gate, without consider-  
 306 ing the usage and disposal stages, and is an adequate approach for biobased and  
 307 renewable products (Rostkowski et al. 2012). Furthermore, it’s the most common  
 308 approach used in LCA for the chemical industry (Santos et al. 2019), which can  
 309 include agrochemical production.

310 For this study, we consider raw material CO<sub>2</sub> to produce a nanocorrective (a  
 311 nanocarbonate) by means of the CCU process.

312 To perform an LCA for NCC production, OpenLCA software was used, covering  
 313 from CO<sub>2</sub> capture (*cradle*) to NCC obtention (*gate*) (Fig. 5). The objective was to  
 314 estimate the environmental impacts, with an emphasis on the carbon footprint, using  
 315 the IPCC methodology (IPCC 2013).

316 The LCA in this study was conducted following the ISO 14040 framework  
 317 (International Organization for Standardization 2006), which defines four  
 318 key phases:

- 319 • Goal and scope definition;
- 320 • Life Cycle Inventory Analysis;
- 321 • Life Cycle Impact Assessment;



**Fig. 4** Greenhouse validation experiment for NCC application in lettuce (*Lactuca sativa*) located at Embrapa Hortaliças research center, central-west region, Brazil

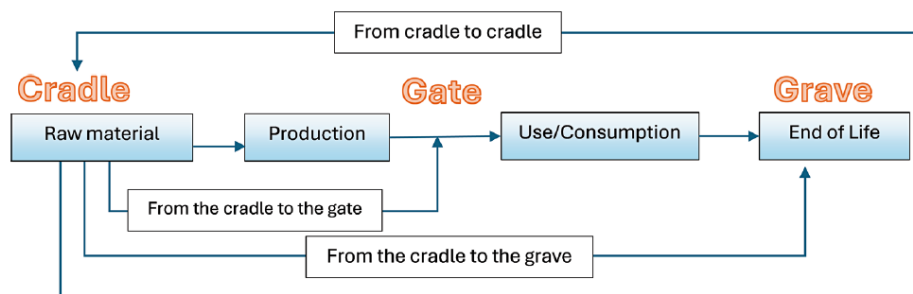


**Fig. 5** Schematic presentation of the LCA system boundaries. This study used the cradle-to-gate approach (left), considering from the raw material ( $\text{CO}_2$ ) to the nanocorrective production

#### • Interpretation.

The main objective was to evaluate the environmental impacts associated with NCC production by means of  $\text{CO}_2$  capture, using a cradle-to-gate system boundary.

The system scope includes direct inputs ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , water, and electricity) and the final product (NCC). Inventory analysis was based on primary experimental data and secondary data from the Ecoinvent version 3.6 database. The interpretation phase highlighted improvement opportunities, as well as data limitations and uncertainties. This approach follows the established practices discussed by Kaur and Kander (2023).

The environmental impact assessment was conducted using IPCC methodology (IPCC 2013), considering two time horizons: 20 years and 100 years. The global warming potential (GWP) and global temperature potential (GTP) were calculated for both timeframes, enabling evaluation of short- and long-term climate effects. This approach was applied to the  $\text{CO}_2$  flow from the NCC synthesis process, in accordance with international LCA guidelines. These indicators are influenced by several factors, including the atmospheric lifetime of greenhouse gases, their radiative forcing intensity, chemical reactivity, and the choice of time horizon. There are uncertainties inherent to the use of climate indicators, especially GTP, which tends to show greater variability compared to GWP. As shown by (Reisinger et al. 2010), uncertainty ranges for GTP at the 100-year horizon can be nearly twice as large as those for GWP. This can significantly affect the interpretation of LCA results.

The LCI analysis in this study used experimental data and secondary datasets, also from the Ecoinvent version 3.6 database. In accordance with ISO 14044 (International Organization for Standardization 2006), it is acknowledged that these inputs carry inherent uncertainties related to data sources, geographic relevance, temporal coverage, and process representativeness. Such uncertainties may significantly affect the results of the LCIA.

A quantitative uncertainty analysis (e.g., Monte Carlo simulation) has not yet been implemented at this stage. Previous studies emphasize the relevance of addressing and disclosing these uncertainties to improve the reliability of LCA outcomes and guide future decision-making (Sun and Ertz 2020; Oliveira et al. 2009).

AU13

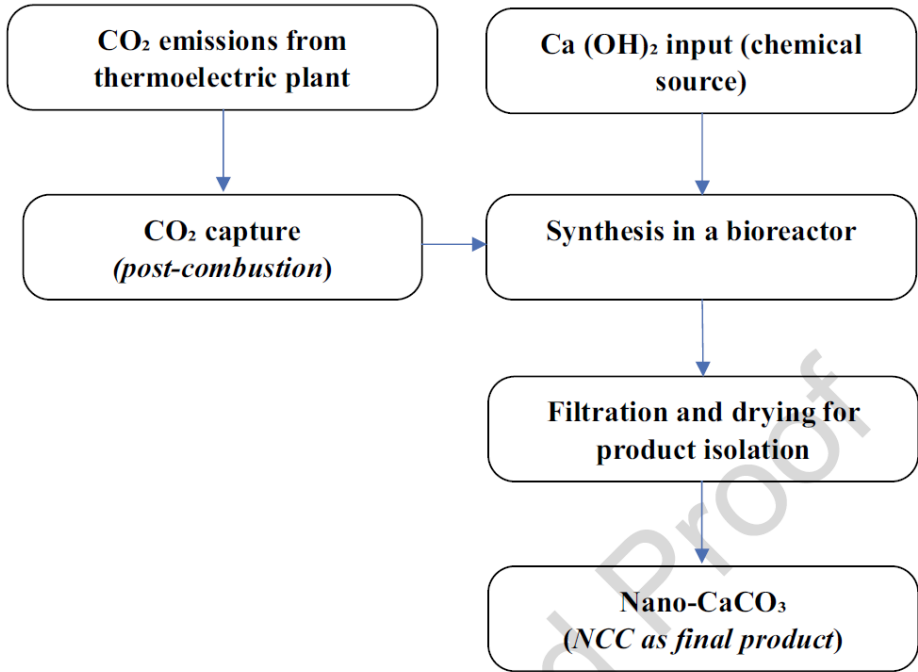


Fig. 6 Input and output flows considered in the LCA

The system boundary of this study includes all stages of NCC synthesis, from CO<sub>2</sub> capture to final NCC obtention, and is characterized as a “cradle-to-gate” LCA. Figure 6 schematically illustrates the input and output flows considered in this LCA. CO<sub>2</sub> capture from the gaseous emissions of the thermoelectric chimney is included in Table 1.

2.5 Data Collection

The data collection process involved both primary and secondary sources. Primary data was obtained directly from the emissions of the industrial process under study (Table 1), with an average emission rate of 2,045,617 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> and a CO<sub>2</sub> capture rate of 160,000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (not shown). The approximate volumetric composition (v/v) of the gas was determined as 81% N<sub>2</sub>, 11% O<sub>2</sub>, and 8% CO<sub>2</sub> (Table 1). Secondary data was gathered from the Ecoinvent version 3.6 database, which provided emissions and energy consumption data from similar industrial processes. These secondary data were used to complement the analysis, ensuring the robustness and accuracy of the environmental impact assessment.

**Table 1** Monitoring gaseous emissions in a thermoelectric boiler

| Gases emitted from chimneys            | Unit                           | Sample 1  | Sample 2  | Sample 3  | Average   |
|----------------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Gas humidity                           | %                              | 13.84     | 14.16     | 14.51     | 14.17     |
| Carbon dioxide                         | %                              | 8.6       | 8.9       | 6.7       | 8.07      |
| Oxygen                                 | %                              | 11.3      | 11.1      | 13.4      | 11.93     |
| Nitrogen                               | %                              | 80.1      | 80        | 79.9      | 80        |
| Water volume in chimney conditions     | m <sup>3</sup>                 | 0.162     | 0.1678    | 0.1709    | 0.1669    |
| Temperature of gases in chimney        | °C                             | 82.3      | 81.8      | 97.3      | 87.1      |
| Gas volume under normal conditions     | m <sup>3</sup>                 | 1.0075    | 1.0168    | 1.0059    | 1.0101    |
| Wet gas volume under normal conditions | m <sup>3</sup>                 | 1.1695    | 1.1846    | 1.1768    | 1.177     |
| Gas flow in chimney conditions         | m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | 1,987,562 | 1,996,322 | 2,152,967 | 2,045,617 |
| Gas flow under normal conditions       | m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | 1,269,186 | 1,271,892 | 1,309,075 | 1,283,384 |

The volume m<sup>3</sup> = Nm<sup>3</sup> is calculated at standard temperature and pressure conditions, 0 °C and 1 atm. Source: Eletrobras CGTEE periodical monitoring bulletin

## 2.6 Modeling in OpenLCA

The imported data is shown in Table 2 from the Ecoinvent version 3.6 database in OpenLCA to access emission factors and process data related to CO<sub>2</sub> capture and NCC production.

For the OpenLCA inventory, the input products and processes that influence the environmental footprint were considered, such as CO<sub>2</sub>, calcium hydroxide, water, and the respective equipment (Table 3), all with an industrial production purpose. A greenhouse can be used in the laboratory for drying the NCC, but on an industrial scale, alternative equipment with greater economic efficiency can be used. The time of use and consumption of energy were measured (Table 3).

## 3 Results and Discussion

The process investigated in this study highlights the potential for sustainable industrial symbiosis by linking two key sectors: energy and agriculture. By capturing CO<sub>2</sub> emissions from thermoelectric sources and repurposing them as feedstock for NCC synthesis, the approach reframes CO<sub>2</sub> from a waste stream into a value-added raw material. This aligns with circular economy principles (Ellen MacArthur Foundation 2025) and sets the foundation for future partnerships between power generation companies and agribusiness stakeholders. The scalability of this solution will depend on pilot-scale technological validation and the establishment of integrated supply chains, including CO<sub>2</sub> capture, NCC production, logistics, and agricultural deployment. Such strategies will be mapped out in the next development phases.

Focusing on the synthesis and characterization of NCC and the use of CO<sub>2</sub> from chimney emissions to produce NCC, we can state that it is an innovative technology.

**Table 2** NCC production inputs and outputs

| Inputs                    | LCI category                                                   | Unit        | Quantity        | For 1 g NCC        |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|--------------------|
| Treated water             | 360: Water collection, treatment, and supply                   | g           | 9900.00         | 73.2845            |
| CO <sub>2</sub>           | Emission to air/unspecified                                    | g           | 95.1            | 0.704              |
| H <sub>2</sub> O          | 360: Water collection, treatment, and supply                   | g           | 24.32           | 0.1800             |
| CaO                       | 239: Manufacture of non-metallic mineral products              | g           | 75.68           | 0.5602             |
| Total process electricity | 351: Electric power generation, transmission, and distribution | KWh         | 12.26           | 0.8724             |
| <b>Outputs</b>            |                                                                | <b>Unit</b> | <b>Quantity</b> | <b>For 1 g NCC</b> |
| NCC                       |                                                                | g           | 135.09          | 1                  |

**Table 3** Equipment operational characteristics

| Equipment                                                     | Time of use (min) | Power (kW) | Value in energy |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-----------------|
| Semi-analytical balance                                       | 20                | 0.01       | 0.00            |
| Boiler                                                        | 10                | 2.00       | 0.33            |
| Bioreactor for Ca(OH) <sub>2</sub> solubilization             | 40                | 0.98       | 0.66            |
| Bioreactor for Ca(OH) <sub>2</sub> suspension cooling         | 30                | 0.98       | 0.49            |
| Bioreactor for CO <sub>2</sub> input at 7 L min <sup>-1</sup> | 10                | 0.98       | 0.16            |
| Thermostatic bath                                             | 30                | 0.92       | 0.46            |
| UltraTurrax-type homogenizer                                  | 12.5              | 0.50       | 0.10            |
| Soil centrifuge                                               | 120               | 4.90       | 9.80            |
| Vacuum pump                                                   | 30                | 0.50       | 0.25            |
| Air circulation and renewal greenhouse                        | 0                 | 2.20       | 0.00            |
| Total in minutes                                              | 302.5             | 9.016      | 12.26           |

This approach offers promising solutions to two global challenges: the reduction of greenhouse gases—lowering the carbon footprint—and the improvement of food production efficiency. Additionally, the LCA performed to enable the measurement of the environmental impact of the process and highlight its environmental advantages as compared to conventional carbon capture and fertilization practices.

Thus, this section presents the key experimental findings, including the physico-chemical characterization of the synthesized NCC, its technical performance metrics, greenhouse trial outcomes, and cradle-to-gate environmental impacts.

### 3.1 Characterization of Nanocarbonate Particles

The determined technical coefficient value of the crystallite size (particle size) was obtained using the XRD data and the Scherrer equation (Eq. 1):

$$\tau = k \times \lambda \beta \times \cos \theta \quad (1)$$

Where  $\tau$  is the average size of the crystallite;  $k$  is the form factor (0.94);  $\lambda$  is the wavelength (CuK $\alpha$ , 1.54059 Å);  $\beta$  is the width at half height of the diffracted peak (full width at half maximum—FWHM in radians); and  $\theta$  is the Bragg angle (Fig. 7).

The precipitated NCC obtained uses aqueous suspension and gas bubbling captured from the thermoelectric power generation process, which characterizes it as a sustainable and non-toxic process.

### 3.2 Technical Performance of Nanocarbonate Particles

The present study evaluated the technical performance of NCC to be applied as nanocorrective, aligned to a nanofertilizer action (see Table 4), focusing on three main aspects: neutralization power, physical characterization in terms of particle size, and synthesis yield. These three aspects were considered technical coefficients for the synthesized NCC (Fig. 8).

According to the analytical results, the first determined value of technical coefficient (DTC)—that means neutralization power—was 78%. This result exceeds the reference technical coefficient (RTC) value, which is  $\geq 67\%$  established by the Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2006). DTC demonstrated superior neutralization efficiency of the NCC product, probably due to the nanometric particle size and a larger reactive surface area.

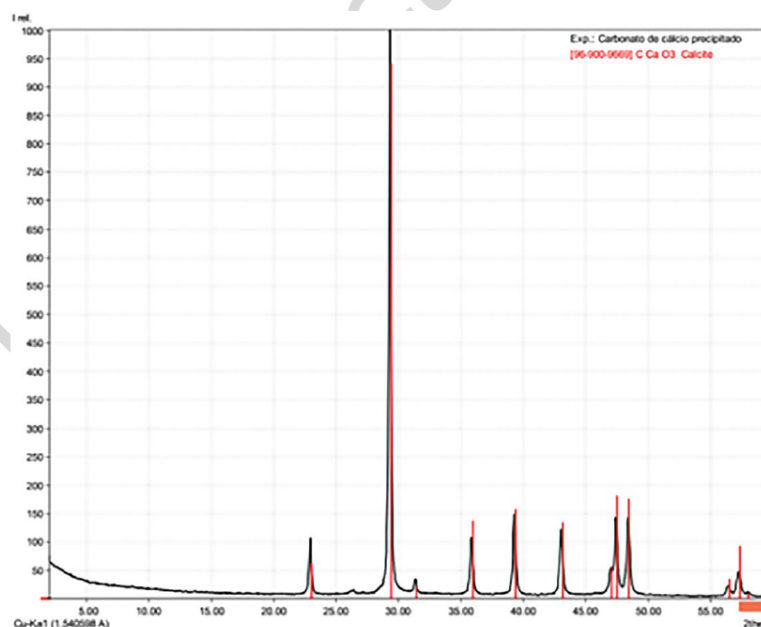


**Fig. 7** X-ray diffractogram of the precipitated calcium carbonate at the nanometer scale—that means, the NCC product—indicating the formation of the calcite polymorph

**Table 4** Summarized results of chemical and physical analyses, and property determinations of the NCC product

| Analysis for nanocorrective and nanofertilizer applications | Results for NCC |
|-------------------------------------------------------------|-----------------|
| <i>Chemical analysis (%)</i>                                |                 |
| Calcium oxide—CaO                                           | 52.4            |
| Calcium carbonate—Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>         | 93.6            |
| Magnesium oxide—MgO                                         | 0.4             |
| Magnesium carbonate—Mg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>       | 0.8             |
| Insoluble residue                                           | 5.5             |
| <i>Physical analysis (%)</i>                                |                 |
| Passing through sieve no. 10                                | 100             |
| Passing through sieve no. 20                                | 100             |
| Passing through sieve no. 30                                | 94              |
| <i>Special determinations (%)</i>                           |                 |
| Neutralizing power                                          | 95              |
| Relative neutralizing power                                 | 93              |
| SiO <sub>2</sub>                                            | 6.3             |
| <i>Special determinations (mg kg<sup>-1</sup>)</i>          |                 |
| Cd                                                          | —               |
| Pb                                                          | —               |
| Sr                                                          | 1.14            |

Analytical parameters established according to the Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2023) and the Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2006)

The DTC1 value for the crystallites ranged between 60 and 80 nm, while for the DTC2 clusters or aggregates, the value was 100 nm. Compared to the RTC value of <5 mm established by Sun et al. (2018), both DTCs are significantly smaller, demonstrating a fine and uniform granulometry, which is desirable for applications as nanofertilizers as a calcium micronutrient source.

The determined synthesis yield value, the last DTC, was 90% w/w, while the RTC value for this type of carbonate was based on the industrial process of producing calcium carbonate in Brazil, which typically yields between 52 and 56% w/w (Dias 2009). The DTC determined here is substantially higher than the industry average, proving the efficiency of the synthesis method.

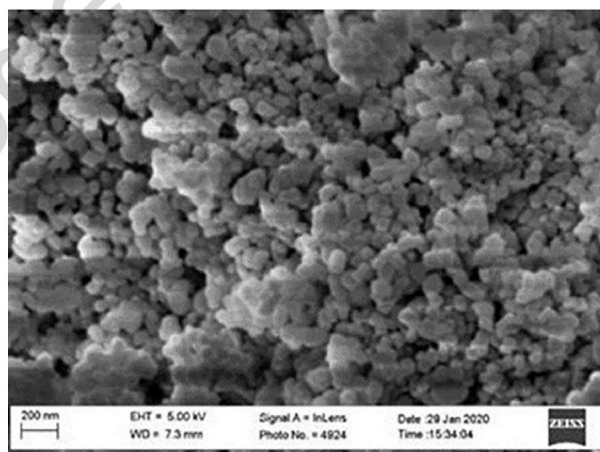
High-resolution SEM micrographs (Fig. 9) show predominantly spherical NCC particles with a very fine size distribution. ImageJ analysis of at least 100 particles indicated crystal sizes between 60 and 80 nm, while aggregates measured around 100 nm in diameter. These values align with the determined technical coefficients (DTC1 and DTC2) and remain well below the 5 µm threshold recommended for nanofertilizer applications (Gupta et al. 2025), confirming a uniform and controlled granulometry. Such consistency in nucleation and particle growth contributes directly to the high neutralization efficiency and reproducibility of the synthesis process.

The SEM image of the synthesized NCC (Fig. 9) reveals a morphology characterized by predominantly spherical particles with diameters below 100 nm. The

**Fig. 8** NCC obtained after drying in an oven at 70 °C



**Fig. 9** SEM image of the NCC product



443 observed uniform particle distribution indicates efficient nucleation and controlled  
444 growth during the carbonation reaction, supporting the quality and reproducibility  
445 of the synthesis process.

446 The results obtained indicate that the NCC not only has excellent neutralization  
447 power, but a favorable physical characteristic allied to a desirable chemical

composition (Table 4). These findings are promising for the development of sustainable and high-quality agrochemical nanoformulation to be used as nanocorrective and nanofertilizer.

### 3.3 Greenhouse Tests for Nanocorrective/ Nanofertilizer Application

The following section presents the results obtained from the greenhouse tests evaluating the efficacy of NCC as a soil corrective in lettuce cultivation; additionally, the activity as a nanofertilizer as a calcium source would be evaluated. The wet and dry weight measurements of the lettuce samples were recorded for different lots treated with the NCC alongside control groups (Table 5). The data collected provides insights into the potential benefits of using NCC to enhance plant growth and productivity.

Compared to other carbon sequestration materials such as biochar, NCC exhibits a distinct behavior in soil systems. While biochar is widely recognized for its high stability and capacity to remove up to 2.68 tons of CO<sub>2</sub> equivalent per ton applied (Fawzy et al. 2022), NCC acts both as a soil acidity corrector and a bioavailable calcium source for plants. A previous study has shown that part of the applied CaCO<sub>3</sub> can be absorbed by roots and incorporated into plant biomass (Morales et al.

**Table 5** Wet and dry weight measurements of the lettuce samples treated with NCC across different lots and control groups

| Planting pot components | Wet weight (kg) | Dry weight (kg) |
|-------------------------|-----------------|-----------------|
| LA NCC 1/3              | 0.6             | 0.05            |
| LA NCC 2/3              | 0.5             | 0.04            |
| LA NCC 3/3              | 0.62            | 0.04            |
| LA NCC total            | 1.72            | 0.13            |
| LB NCC 1/3              | 0.63            | 0.04            |
| LB NCC 2/3              | 0.54            | 0.05            |
| LB NCC 3/3              | 0.46            | 0.03            |
| LB NCC total            | 1.63            | 0.13            |
| LC NCC ½                | 0.15            | 0.02            |
| LC NCC 2/2              | 0.13            | 0.02            |
| LC NCC total            | 0.28            | 0.05            |
| LD NCC                  | 0.31            | 0.04            |
| LE NCC                  | 0.31            | 0.04            |
| Control 1               | 0.63            | 0.05            |
| Control 2               | 0.63            | 0.05            |
| Control 3               | 0.13            | 0.02            |
| Control 4               | 0.08            | 0.02            |
| Total                   | 5.72            | 0.51            |

LA lot A, LB lot B, LC lot C, LD lot D, LE lot E, NCC nano-(CaCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

2023). The remaining portion tends to form stable phases within the soil, particularly under neutral to alkaline conditions, with a low likelihood of CO<sub>2</sub> re-release. These characteristics support the potential of NCC as a complementary carbon sequestration strategy in agricultural systems.

The consistency between lots and control also indicates the potential agronomic reliability.

### 3.4 Life Cycle Assessment Approach

The environmental impact of the production process was assessed using LCA through the OpenLCA software. This analysis quantifies the total carbon footprint to CO<sub>2</sub> and evaluates key impact categories, including global warming potential (GWP) and global temperature potential (GTP) related to the environmental impact of greenhouse gas emissions. These make it possible to quantify and compare the effects of these gases on global warming or climate change. CO<sub>2</sub> capture power was determined to be 6.54% total—i.e. total “CO<sub>2</sub> footprint.”

#### 3.4.1 Global Warming Potential (GWP) and Global Temperature Potential (GTP)

The GWP is a metric that measures the relative impact of a greenhouse gas relative to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), considering a specific time period (usually 20, 100, or 500 years). The GWP of CO<sub>2</sub> is defined as 1 Eq and the GWP values of other gases are compared to the impact of one unit of CO<sub>2</sub>. For example, methane (CH<sub>4</sub>) has a GWP of approximately 25 Eq over a 100-year horizon, meaning that it has a 25 times greater effect than CO<sub>2</sub> on global warming over that period (U.S. Environmental Protection Agency 2025).

The GTP is a metric that evaluates the impact of a greenhouse gas in terms of the increase in global average temperature over a given time horizon. GTP differs from GWP in that it focuses directly on temperature change (Table 6), rather than accumulated radiative balance. Like GWP, the GTP of CO<sub>2</sub> is considered 1, and the other gases are evaluated based on their potential to increase temperature as compared to CO<sub>2</sub>. GWP measures the cumulative effect on global warming caused by emissions of a gas over a specific period (European Commission 2021). GTP measures the

**Table 6** NCC impact category calculated by the software openLCA

| Impact category         | Reference unit         | Result (kg) | Result (g) |
|-------------------------|------------------------|-------------|------------|
| Climate change—GTP 100y | kg CO <sub>2</sub> -eq | 0.016530    | 16.530.764 |
| Climate change—GTP 20y  | kg CO <sub>2</sub> -eq | 0.023266    | 23.266.705 |
| Climate change—GWP 100y | kg CO <sub>2</sub> -eq | 0.019182    | 19.182.549 |
| Climate change—GWP 20y  | kg CO <sub>2</sub> -eq | 0.024934    | 24.934.502 |

impact of a gas on the global average temperature at a specific point in time. Both metrics are used in environmental assessments to understand and compare the climate impacts of different gases, aiding in the formulation of climate policies and the development of more sustainable technologies.

The result for GTP over 100 years (Fig. 10) is 16.53 gCO<sub>2</sub>-eq, while for GTP over 20 years (Fig. 11), it is 23.26 gCO<sub>2</sub>-eq. This indicates that the global temperature potential of the NCC production process is higher when considering a 20-year time frame compared to a 100-year window, highlighting the increased impact of emissions in the short term.

The result for GWP over 100 years (Fig. 12) is 19.18 gCO<sub>2</sub>-eq, whereas for GWP over 20 years (Fig. 13), it is 24.93 gCO<sub>2</sub>-eq. Similar to GTP, the GWP over 20 years is higher than over 100 years, emphasizing the significance of short-term emissions of the NCC production process in global warming potential.

The difference between GTP and GWP behaviors is due to the different approaches to assessing the impact of greenhouse gas emissions. GWP measures warming potential based on radiation absorption, while GTP measures impact on average global temperature.

The results show that, regardless of the method (GTP or GWP), the carbon footprint of the NCC production—considering the cradle-to-gate LCA approach—is relatively small, with values ranging from GTP100y of 16.53 gCO<sub>2</sub>-eq to GTP20y of 23.26 gCO<sub>2</sub>-eq.

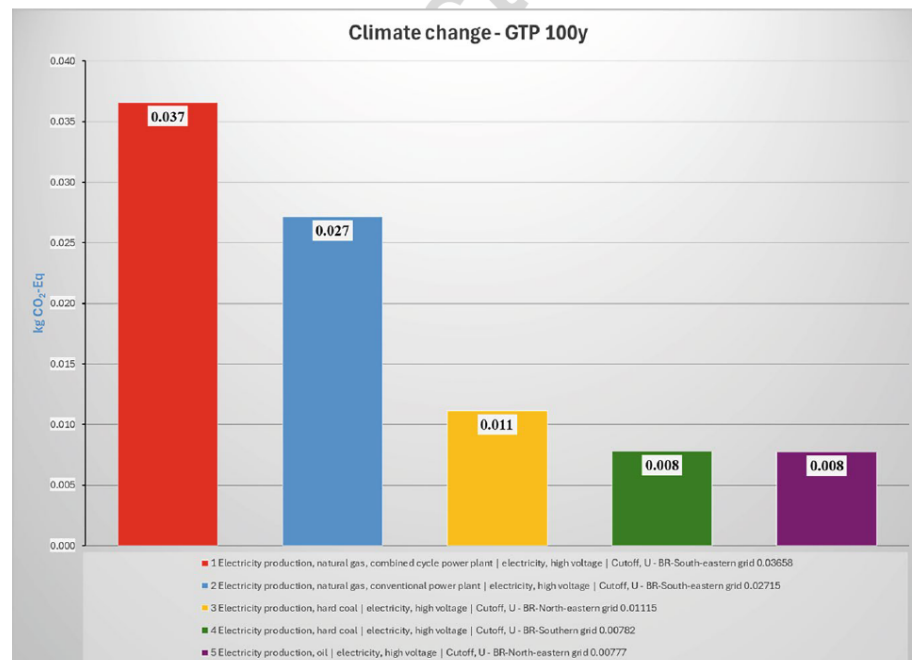


**Fig. 10** Impact category climate change for GTP 100y, based on cradle-to-gate LCA

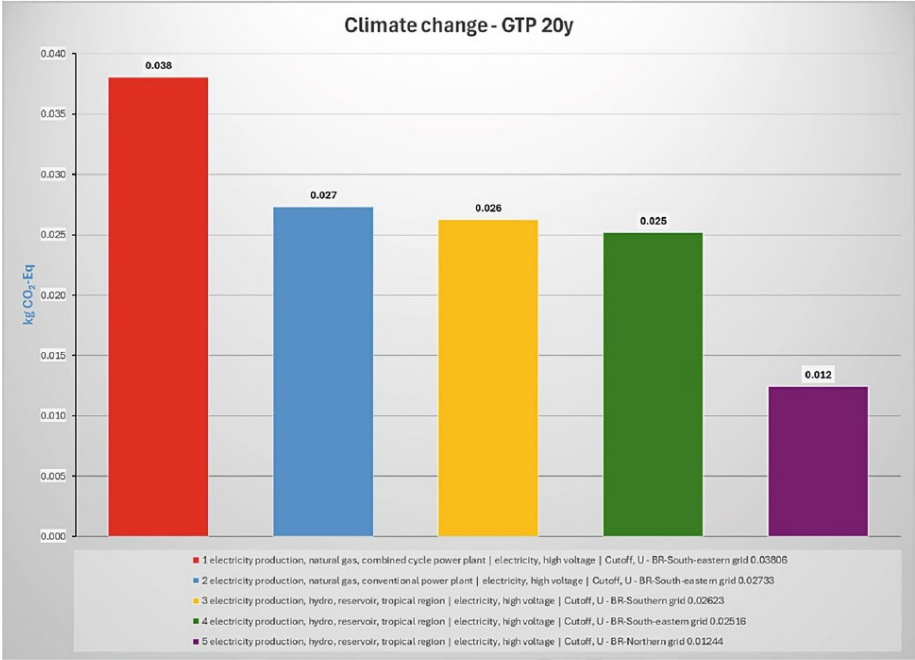


Fig. 11 Impact category climate change for GTP 20y, based on cradle-to-gate LCA

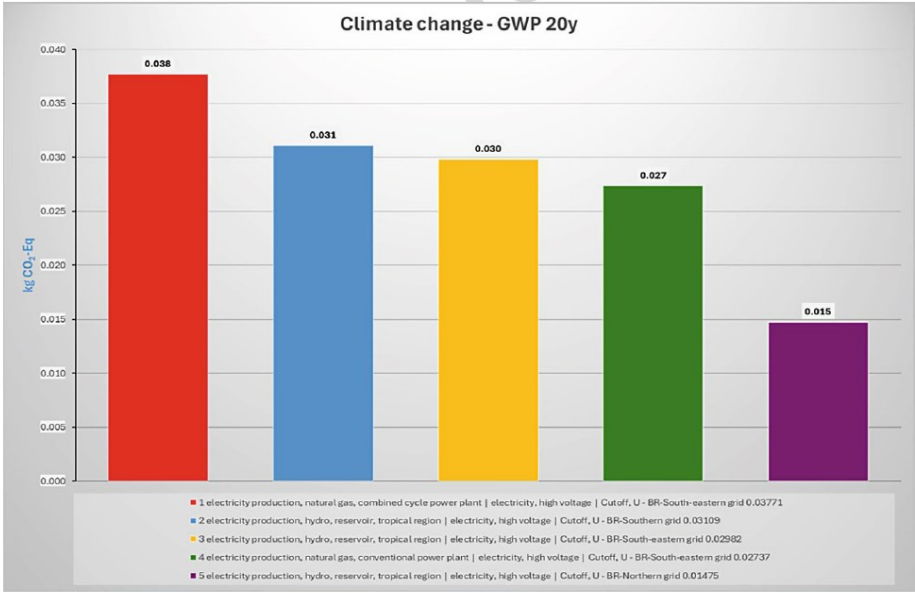


Fig. 12 Impact category climate change for GWP 20y, based on cradle-to-gate LCA

The emission of CO<sub>2</sub> into air/unspecified from fossil fuel burning (Fig. 14) refers to the release of this gas into the atmosphere from the burning of fossil fuels, such as coal, oil, and natural gas. The designation “unspecified” indicates that the exact source of the CO<sub>2</sub> emission is not detailed, only that the origin of the carbon is a fossil fuel (i.e., coal for thermoelectric plant).

Carbon dioxide is a major greenhouse gas released during the combustion of fossil fuels, where carbon stored for millions of years is oxidized and emitted into the atmosphere, intensifying global warming and climate instability. Fossil CO<sub>2</sub> emissions are one of the main causes of increased greenhouse gas concentrations in the atmosphere, leading to climate change (Vaz Jr et al. 2022). This process of releasing carbon that was previously sequestered contributes significantly to global warming.

The designation “emission to air/unspecified” suggests that while the CO<sub>2</sub> emission is accounted for, the precise source (such as a specific type of fossil fuel or a specific facility) is not identified. This can occur in emissions inventories when one seeks to account for all CO<sub>2</sub> emissions from fossil sources without discriminating against each specific source. Briefly, the term describes the contribution to atmospheric pollution by CO<sub>2</sub> from fossil fuels, without specifying the exact source of this emission.

One of the main advantages of this NCC agricultural input is its production potential in regions with limited reserves of agricultural limestone for soil

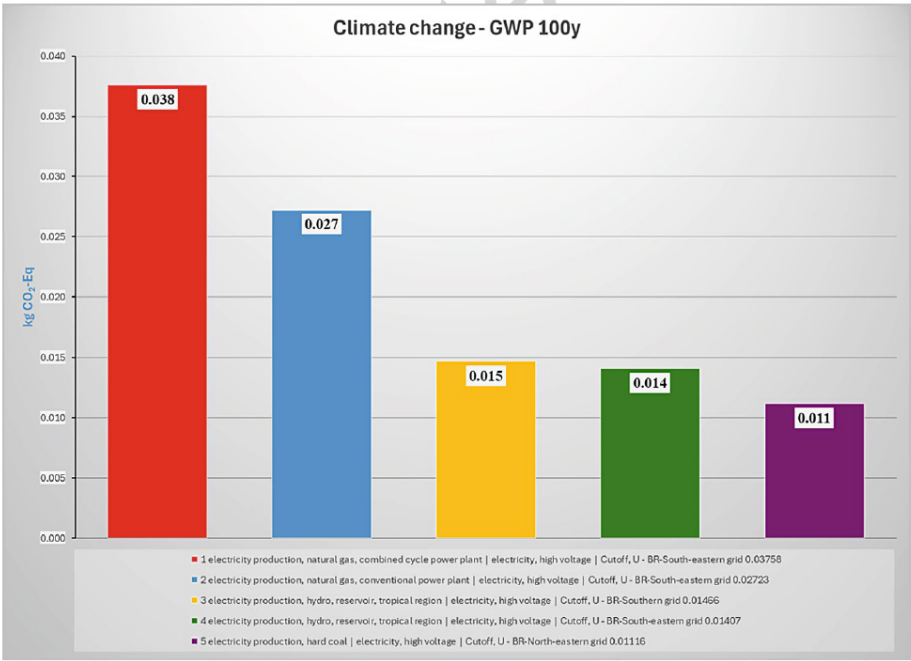


Fig. 13 Impact category climate change for GWP 100y, based on cradle-to-gate LCA

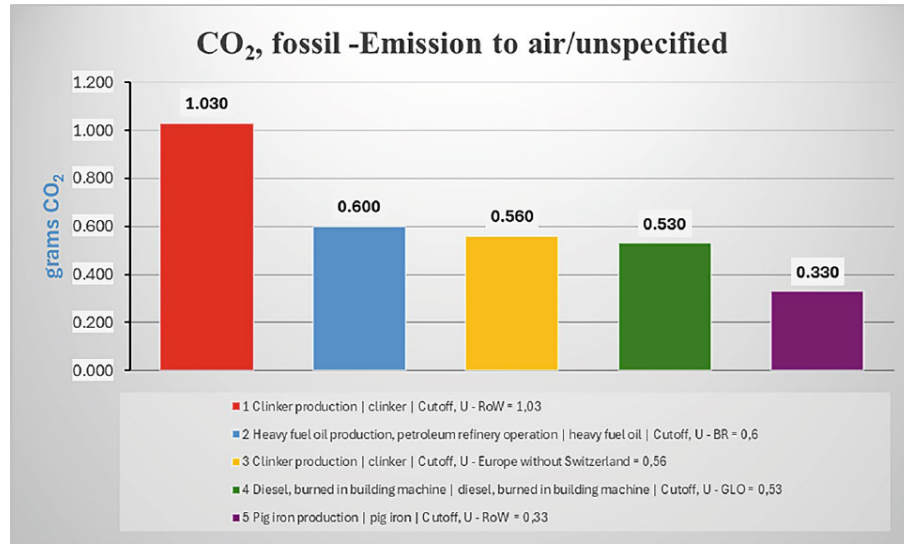


**Fig. 14** Carbon dioxide, fossil emission to air/unspecified, based on cradle-to-gate LCA

corrective, such as the north and south regions of Brazil. These areas have CO<sub>2</sub> emissions available from thermal power plants and/or sugarcane processing, making them ideal locations to produce this nnaocorrective and nanofertilizer. Another significant advantage is that the nanocorrective offers a sustainable solution for the proper disposal of gaseous effluents from burning coal, aligning with Sustainable Development Goal 13, which focuses on climate action, as described in the United Nations 2030 Agenda (United Nations 2025).

The results of the LCA further emphasize the environmental benefits of the NCC production process as a CCU process to decarbonize energy production, as observed by Vaz Jr et al. (2022). For instance, the GTP over 100 years is 0.016530764 kg CO<sub>2</sub>-eq, and over 20 years is 0.023266705 kg CO<sub>2</sub>-eq. Similarly, the global warming potential in 100 years (GWP 100y) is 0.019182549 kg CO<sub>2</sub>-eq, and in 20 years (GWP 20y) is 0.024934502 kg CO<sub>2</sub>-eq. These results demonstrate the effectiveness of CO<sub>2</sub> capture and its conversion to NCC in mitigating the impacts of climate change.

### 3.5 Outlook of Opportunities

The CCUS technology developed enables important agricultural innovations that, after greenhouse validation, can contribute to increased crop productivity. This relates directly to Sustainable Development Goal 2, which aims to achieve zero hunger and promote sustainable agriculture (United Nations 2025). An important aspect to consider is that the nanocorrective/nanofertilizer also can supports carbon

pricing mechanisms, specifically for residual CO<sub>2</sub>, supporting the transition to a low/zero-carbon economy. This aligns with initiatives led by the World Bank Group (2025), particularly for countries that rely heavily on fossil fuels.

Even if humanity drastically reduces carbon dioxide emissions in the near future, the world will still need to remove between 450 billion and 1.1 trillion metric tons of CO<sub>2</sub> by 2100 (Deutsche Welle 2023).

The United Nations' Intergovernmental Panel on Climate Change said in 2022 that the use of CO<sub>2</sub> removal technologies will be "inevitable" if the world is to meet its net-zero emissions targets (Küller 2024). Experts warn that the sector will need substantial development over the next 10 years. Currently, it is estimated that only 0.1% of global emissions are captured by CO<sub>2</sub> removal technology.

Nanotechnology can significantly increase nutrient use efficiencies in crops by reducing losses from conventional fertilizers through nutrient delivery systems at the nanoscale. These nanofertilizers are composed of encapsulated nutrients in nanomaterials, such as nanotubes, nanoporous materials, or coatings with a thin polymeric film (De Rosa et al. 2010; Raliya et al. 2018; Kalwani et al. 2022). Agricultural nanotechnology could be applied to synchronize, for instance, calcium release with uptake by crops, potentially using nanocarbonates to capture CO<sub>2</sub> and turn it into a useful form for plants.

The approach adopted in this study aligns with circular economy principles by converting residual CO<sub>2</sub> from thermoelectric plants into a value-added agricultural input. Rather than addressing coal mining directly, the focus is on valorizing unavoidable industrial emissions through local and efficient reuse. This not only reduces the environmental impact of flue gases, but also promotes industrial symbiosis, especially when NCC production is integrated on-site or near CO<sub>2</sub> emission sources.

Although this pathway does not eliminate the sustainability challenges of fossil-based energy, it offers a transitional solution for reducing emissions and creating circular value chains. By reintroducing captured CO<sub>2</sub> into productive systems, the process supports climate mitigation and sustainable agriculture.

On this way, Zhang et al. (2022) demonstrated that nanocarbonate materials can exhibit high reactivity, contributing to more efficient agricultural practices. This statement reinforces the innovative nature of the current study and its alignment with clean technology and circular economy trends.

### 3.6 Limitations of This Study

Despite the encouraging results presented here, this study acknowledges certain limitations. The work focused on evaluating the laboratory-scale synthesis of NCC using captured CO<sub>2</sub> and its potential agricultural application. Several research gaps still need to be addressed, including extending LCA boundaries to upstream and downstream stages, validating results in different agro-environmental conditions,

598 assessing economic feasibility for up-scale, and exploring applications beyond soil  
599 amendment.

600 These next steps will be essential for scaling the technology and consolidating  
601 NCC use in the circular economy and in carbon mitigation strategies.

## 602 4 Conclusions

603 This study investigated the feasibility of synthesizing NCC from captured CO<sub>2</sub>  
604 emissions, evaluating its potential as a soil amendment and climate mitigation solu-  
605 tion. The main objective was to develop a laboratory-scale production route and  
606 assess its environmental impacts through LCA, while also testing its agricultural  
607 performance in a greenhouse under controlled conditions.

608 The LCA results provided further support for the environmental benefits of the  
609 process. The GTP 100y resulted in 16.531 grams of CO<sub>2</sub>-eq, and the GTP 20y  
610 resulted in 23.267 g of CO<sub>2</sub>-eq. For GWP, the results were 19.183 g of CO<sub>2</sub>-eq over  
611 100 years and 24.935 g of CO<sub>2</sub>-eq over 20 years. These findings highlighted the  
612 reduced carbon footprint associated with the NCC production process.

613 The NCC meets the requirements of the Brazilian Ministry of Agriculture and  
614 Poultry for soil acidity correction and, additionally, as a fertilizer because it pro-  
615 vides bioavailable calcium. Its particle size (100 nm) and synthesis yield (90% w/w)  
616 offer competitive advantages over established products. Product benefits include  
617 providing soil amendments in regions with limited limestone reserves and support-  
618 ing the United Nations' Sustainable Development Goals, while probably assisting  
619 in CO<sub>2</sub> pricing to promote a low-carbon economy.

620 NCC has substantial potential to reduce the CO<sub>2</sub> footprint, especially when  
621 applied sustainably in agriculture. The adoption of this technology can promote  
622 more sustainable industrial and agricultural practices, aligning with global goals of  
623 mitigating climate change and promoting food security. The development and  
624 deployment of NCC-based technologies must be accompanied by rigorous risk and  
625 benefit assessments to ensure long-term environmental and economic viability.

626 Although the preliminary laboratory and agronomic results are promising, the  
627 adoption of NCC in agricultural systems must consider regulatory aspects. It will be  
628 necessary to investigate its legal classification as a soil amendment, conduct appro-  
629 priate toxicological assessments, and ensure compliance with international guide-  
630 lines regarding the safe use of nanomaterials in agriculture.

631 **Acknowledgments** The authors thank Embrapa and Eletrobras for the funding (the Agricarbono  
632 project).

## References

- Alalwan HA, Alminshid AH (2021) CO<sub>2</sub> capturing methods: chemical looping combustion (CLC) as a promising technique. *Sci Total Environ* 788:147850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147850>
- Albert R, Pinto L, Miguel P, Stumpf L, Leidemer J (2022) Acidification potential of geological materials in a coal mining area in southern Brazil. *J South Am Earth Sci* 120:104103. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104103>
- Arezki R, Ramey VA, Sheng L (2017) News shocks in open economies: evidence from giant oil discoveries. *Q J Econ* 132:103–155. <https://ideas.repec.org/a/oup/qjecon/v132y2017i1p103-155..html>
- Branco PM (2014) Carvão mineral [Mineral coal]. <https://www.sgb.gov.br/carvao-mineral>. Accessed Jun 2025
- Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2006) Normative Instruction SDA nº 35, July 4, 2006. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf/view>. Accessed Jun 2025
- Brazilian Ministry of Agriculture and Poultry (2023) Manual of official analytical methods for fertilizers, correctives, substrates, conditioners and soil remineralizers. [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acao-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2023/arquivos-das-consultas-publicas/copy2\\_of\\_MANUALDEMTODOS\\_minuta.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acao-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2023/arquivos-das-consultas-publicas/copy2_of_MANUALDEMTODOS_minuta.pdf). Accessed Jun 2025
- Burgess AJ, Pranggono R, Escribà-Gelonch M, Hessel V (2024) Biofortification for space farming: maximising nutrients using lettuce as a model plant. *Future Foods* 9:2666–8335. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100317>
- Chao C, Deng Y, Dewil R, Bayens J, Fan X (2021) Post-combustion carbon capture. *Renew Sustain Energy Rev* 138:110490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110490>
- Cheng F, Zhang Y, Zhang G, Zhang K, Wu J, Zhang D (2024) Eliminating environmental impact of coal mining wastes and coal processing by-products by high temperature oxy-fuel CFB combustion for clean power generation: a review. *Fuel* 373:0016–2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132341>
- De Rosa MC, Monreal C, Schnitzer M, Walsh R, Sultan Y (2010) Nanotechnology in fertilizers. *Nat Nanotechnol* 5:91. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.2>
- Deutsche Welle (2023) Can carbon removal help meet world's climate targets? <https://www.dw.com/en/can-carbon-removal-help-meet-worlds-climate-targets/a-64448296>. Accessed Jun 2025
- Dias AP (2009) Produção de Carbonato de Cálcio no Estado do Rio de Janeiro [Calcium Carbonate Production in the State of Rio de Janeiro]. Final Course Monograph—Bachelor's Degree in Geology. Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/4300/1/DIAS%2C%20A.P.pdf>. Accessed Jun 2025
- Ellen MacArthur Foundation (2025) What is a circular economy? <https://www.ellenmacarthur-foundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. Accessed Jun 2025
- European Commission (2021) Global temperature change potential. [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/global-temperature-change-potential\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/global-temperature-change-potential_en). Accessed Jun 2025
- Fonseca JPCA, Neto JMC, Lang MC (2024) Desenvolvimento da cultura da alface sob diferentes doses de adubo organomineral [development of lettuce crops under different doses of organomineral fertilizer]. *Sci Rural* 28:12–24. <https://www.phantomstudio.com.br/index.php/ScientiaRural/article/view/3206>
- Guinea L, Pérez R, Ruiz J (2024) Asymmetric effects of financial volatility and volatility-of-volatility shocks on the energy mix. *Financ Res Lett* 61:104938. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.104938>
- Guio E (2021) Blog Esfera: Fontes de energia e energia do carvão mineral: entenda o que é e como ela é utilizada no Brasil [Energy sources and coal energy: understand what it is and how it is used in Brazil]. <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-carvao-mineral>. Accessed Jun 2025

- Gupta S, Kant K, Kaur N, Jindal P, Ali A, Naeem M (2025) Nano-calcium applications in modern agriculture: a review. *Plant Nano Biol* 12:100147. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2025.100147>
- Heidarabad RG, Shin K (2024) Carbon capture and storage in depleted oil and gas reservoirs: the viewpoint of wellbore injectivity. *Energies* 17:1201. <https://doi.org/10.3390/en17051201>
- International Energy Agency (2023) Coal 2023—Analysis and forecast to 2026. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72a7ffa-c5f2-4ed8-a2bf-eb035931d95c/Coal\\_2023.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72a7ffa-c5f2-4ed8-a2bf-eb035931d95c/Coal_2023.pdf). Accessed Jun 2025
- International Organization for Standardization (2006) Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. ISO 14040: 2006. <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Accessed Jun 2025
- IPCC (2013) Climate change 2013: the physical science basis. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds) Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY, p 1535
- Ju Y, Nie X, Yan Z, Kai W, Zhou H, Shirong G (2024) Stress distribution and roof subsidence of surrounding strata considering in situ coal conversion and CO<sub>2</sub> mineralization backfilling: photoelastic experiments using 3D-printed models of mining faces and goafs. *Sci Total Environ* 912:169368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169368>
- Kalwani M, Chakdar H, Srivastava A, Pabbi S, Shukla P (2022) Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: emerging trends and perspectives. *Chemosphere* 287(Part 2):132107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132107>
- Kaur G, Kander R (2023) The sustainability of industrial hemp: a literature review of its economic, environmental, and social sustainability. *Sustainability* 15:6457. <https://doi.org/10.3390/su15086457>
- Khalaf EM, Mohammadi MJ, Sulistiyani S, Ramírez-Coronel AA, Kiani F, Jalil AT, Almulla AF, Asban P, Farhadi M, Derikondi M (2024) Effects of sulfur dioxide inhalation on human health: a review. *Rev Environ Health* 39:331–337. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0237>
- Küller M (2024) Como funciona a captura e armazenamento de carbono [How carbon capture and storage works]. <https://www.dw.com/pt-br/como-funciona-a-captura-e-armazenamento-de-carbono/a-68195595>. Accessed Jun 2025
- Liu H, Yang D, Zheng Z, Ke X, Wacławik E, Zhu H, Frost RL (2010) A Raman spectroscopic and TEM study on the structural evolution of Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub> during the transition to Na<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub>. <https://doi.org/10.1002/jrs.2561>
- Madejski P, Chmiel K, Subramanian N, Kuś T (2022) Methods and techniques for CO<sub>2</sub> capture: review of potential solutions and applications in modern energy technologies. *Energies* 15:887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>
- Malvern Panalytical (2025) X-ray diffraction (XRD). A non-destructive technique to study all types of material. <https://www.malvernpanalytical.com/br/products/technology/xray-analysis/x-ray-diffraction>. Accessed Jun 2025
- Maniarasu R, Rathore SK, Murugan S (2023) A review on materials and processes for carbon dioxide separation and capture. *Energy Environ* 34:3–57. <https://doi.org/10.1177/0958305X211050984>
- Morales J, Martínez-Alcántara B, Bermejo A, Millos J, Quiñones A (2023) Effect of calcium fertilization on calcium uptake and its partitioning in citrus trees. *Agronomy* 13:2971. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122971>
- Oliveira FA, Rocha AC, Filho JT, Couto PRG (2009) Uncertainty of measurement by Monte Carlo simulation and metrological reliability in the evaluation of electric variables of PEMFC and SOFC fuel cells. *Measurement* 42:1497–1501. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.08.005>
- Osman AI, Ayati A, Krivoschapkin P, Tanhaei B, Farghali M, Yap P-S, Abdelhaleem A (2024) Coordination-driven innovations in low-energy catalytic processes: advancing sustainability in chemical production. *Coord Chem Rev* 514:215900. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215900>

## Life Cycle Assessment of a Nanocorrective/Nanofertilizer Obtained from Carbon...

- Oughton C, Kurup B, Anda M, Ho G (2022) Industrial symbiosis to circular economy: what does the literature reveal for a successful complex industrial area? *Circ Econ Sustain* 2:1317–1344. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00153-1>
- Qi Y, Stern N, Wu T, Lu J, Green F (2016) China's post-coal growth. *Nat Geosci* 9:564–566. <https://doi.org/10.1038/ngeo2777>
- Raliya R, Saharan V, Dimkpa C, Biswas P (2018) Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: current state and future perspectives. *J Agric Food Chem* 66:6487–6503. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178>
- Reisinger A, Meinshausen M, Manning M, Bodeker G (2010) Uncertainties of global warming metrics: CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. *Geophys Res Lett* 37:L14707. <https://doi.org/10.1029/2010GL043803>
- Rostkowski KH, Criddle CS, Lepech MD (2012) Cradle-to-gate life cycle assessment for a cradle-to-cradle cycle: biogas-to-bioplastic (and back). *Environ Sci Technol* 46:9822–9829. <https://doi.org/10.1021/es204541w>
- Santos A, Barbosa-Póvoa A, Carvalho A (2019) Life cycle assessment in chemical industry—a review. *Curr Opin Chem Eng* 26:139–147. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.009>
- Sun S, Ertz M (2020) Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. *MethodsX* 7:101046. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101046>
- Sun R, Zhang P, Bejnóczy ÉG, Neagu A, Tai CW, Persson I, Stromme M, Cheung O (2018) Amorphous calcium carbonate constructed from nanoparticle aggregates with unprecedented surface area and mesoporosity. *ACS Appl Mater Interfaces* 10:21556–21564. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b03939>
- Tupajić I, Đurić N, Miladinović V, Zečević V, Đorđević R, Bajagić M, Ugrinović M (2024) Influence of two different types of fertilizer on baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a hydroponic system. In: Book of Proceedings. XIII International Symposium on Agricultural Sciences AgroReS 2024, 27–30 May 2024, Trebinje, Bosnia and Herzegovina. <https://doi.org/10.7251/ZARS2401074T>
- U.S. Environmental Protection Agency (2025) Understanding global warming potentials. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. Accessed Jun 2025
- United Nations (2025) The 17 goals. <https://sdgs.un.org/goals/>. Accessed Jun 2025
- Vaz S Jr, de Souza AP, Baeta BEL (2022) Technologies for carbon dioxide capture: a review applied to energy sectors. *Clean Eng Technol* 8:100456. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>
- World Bank Group (2025) State and trends of carbon pricing 2025. <https://www.worldbank.org/en/publication/state-and-trends-of-carbon-pricing>. Accessed Jun 2025
- Xu C, Dai Q, Steubing B, Hu M, Harpprecht C, van der Meide M, Tukker A (2022) Future greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion battery cell production. *Resour Conserv Recycl* 187:106606. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106606>

# Author Queries

Chapter No.: 13      0006194831

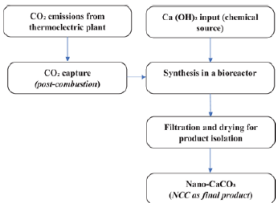
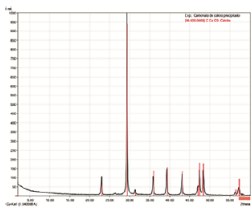
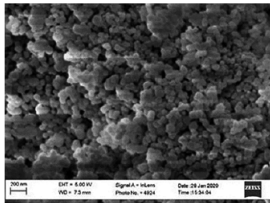
| Queries | Details Required                                                                                                                                                                                                                               | Author's Response |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| AU1     | Please check and confirm if the author names and their affiliations are presented correctly.                                                                                                                                                   |                   |
| AU2     | The citation "Albert et al., 2024" has been changed to "Albert et al. 2022" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.    |                   |
| AU3     | The citation "Liu, 2010" has been changed to "Liu et al. 2010" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.                 |                   |
| AU4     | The citation "Cheng, 2024" has been changed to "Cheng et al. 2024" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.             |                   |
| AU5     | "Yang 2024, Rodrigues 2022, Ahmad 2023, BP Global 2024, Kumar et al. 2021, Fawzy et al. 2022, Zhang et al. 2022" were mentioned in the text but not in the reference list. Please provide their bibliographic informations.                    |                   |
| AU6     | The citation "Khalaf, 2024" has been changed to "Khalaf et al. 2024" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.           |                   |
| AU7     | The citation "Xu, 2022" has been changed to "Xu et al. 2022" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.                   |                   |
| AU8     | The citation "Maniarasu, 2023" has been changed to "Maniarasu et al. 2023" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.     |                   |
| AU9     | The citation "Heidarabad, 2024" has been changed to "Heidarabad and Shin 2024" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary. |                   |
| AU10    | The citation "Chao et al., 2020" has been changed to "Chao et al. 2021" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.        |                   |
| AU11    | The citation "Fonseca, 2024" has been changed to "Fonseca et al. 2024" to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.         |                   |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| AU12 | The citation “Burgess, 2024” has been changed to “Burgess et al. 2024” to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary.         |  |
| AU13 | The citation “Kaur et al. (2023)” has been changed to “Kaur and Kander (2023)” to match the author name/date in the reference list. Please check if the change is fine in this occurrence and modify the subsequent occurrences, if necessary. |  |
| AU14 | Please note that the image is blurred in the artwork of “Fig. 7”. Kindly check and confirm shall we process as is or otherwise provide better quality figure.                                                                                  |  |
| AU15 | Reference “Ju et al. (2024)” was not cited anywhere in the text. Please provide in text citation or delete the reference from the reference list.                                                                                              |  |

## Alternative Texts for Your Images, Please Check and Correct them if Required

| Page no | Fig/Photo | Thumbnail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Alt-text Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Fig1      | <pre> graph TD     A[Raw Material: Mineral] --&gt; B[Thermoelectric Power Plants]     B --&gt; C[ENERGY]     B --&gt; D[Waste]     D --&gt; E["Gases: 81% N<sub>2</sub>, 11% O<sub>2</sub>, and 8% CO<sub>2</sub>"]     D --&gt; F["Others: solids (ashes) etc..."]     E --&gt; G["Chemical Capture<br/>(Stage I)"]     G --&gt; H["Recovery<br/>(Stage II)"]     H --&gt; I["Dried Calcium<br/>Nanocarbonate 90%<br/>(Stage III)"]     I --&gt; J[Nanocorrective]     subgraph Inventory         G         H         I     end </pre>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>Flow chart illustrating the process of converting raw mineral materials into energy and byproducts in thermoelectric power plants. The process begins with raw minerals, leading to energy production and waste generation. Waste includes gases composed of 81% nitrogen, 11% oxygen, and 8% carbon dioxide. The gases undergo chemical capture (Stage I), recovery (Stage II), and are converted into dried calcium nanocarbonate (Stage III). The final product is labeled as nanocorrective. The section labeled “Inventory” encompasses the stages of chemical capture, recovery, and nanocarbonate production.</p>                                                                        |
|         | Fig2      | <pre> graph TD     subgraph Inputs         A["9.905g H<sub>2</sub>O (distilled water)<br/>100.44g Ca(OH)<sub>2</sub> (calcium hydroxide)"]         B["pH meter equipped to the Bioreactor - 9.9m"]         C["Standard Solutions: (Specific)<br/>pH 7 Buffer Solution (0.05M to 0.05M to 0.05M to 0.05M)<br/>pH 9 Buffer Solution (0.05M to 0.05M to 0.05M to 0.05M)"]         D["N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> Gas mixture from 20L/min"]     end     subgraph Process         E["Solution 1: 1%<br/>(10L)"]         F["Reactor: Bioflo 120<br/>(10L)"]         G["pH 11.72<br/>53.5°C<br/>800 rpm<br/>40 min"]         H["pH 11.99<br/>53.5°C<br/>800 rpm<br/>40 min"]         I["Calcium carbonate<br/>6.67%<br/>pH 11.72<br/>25°C<br/>1000 rpm<br/>30 min"]     end     subgraph Outputs         J["Recovery of precipitated<br/>Calcium Carbonate"]         K["1.5gms"]     end     A --&gt; E     B --&gt; F     C --&gt; F     D --&gt; F     E --&gt; F     F --&gt; G     F --&gt; H     G --&gt; I     H --&gt; I     I --&gt; J     J --&gt; K </pre> | <p>Flow chart illustrating the process of synthesizing calcium carbonate particles. It begins with the entry of 9.905g of distilled water and 100.44g of calcium hydroxide. A pH meter is set with standard solutions at pH 7 and pH 9. A gas mixture of nitrogen, oxygen, and carbon dioxide flows at 20L/min. Solution 1, at 10L and 1% w/w, is used in Step I. The bioreactor, Bioflo 120, is jacketed with stirring, starting at an initial pH of 11.99, temperature of 53.5°C, 800 rpm for 40 minutes. Calcium carbonate synthesis occurs at an initial pH of 11.72, 25°C, 1000 rpm for 30 minutes. The process concludes with the recovery of precipitated calcium carbonate in Step II.</p> |



| Page no | Fig/Photo | Thumbnail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Alt-text Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Fig6      |  <pre> graph TD     A[CO2 emissions from thermoelectric plant] --&gt; C[CO2 capture (post-combustion)]     B[Ca(OH)2 input (chemical source)] --&gt; D[Synthesis in a bioreactor]     C --&gt; D     D --&gt; E[Filtration and drying for product isolation]     E --&gt; F[Nano-CaCO3 (NCC as final product)]   </pre> | <p>Flow chart illustrating the process of producing Nano-CaCO<sub>3</sub>. It begins with CO emissions from a thermoelectric plant, followed by CO capture (post-combustion). Concurrently, Ca(OH)<sub>2</sub> is input as a chemical source. Both inputs proceed to synthesis in a bioreactor. The process continues with filtration and drying for product isolation, culminating in the production of Nano-CaCO<sub>3</sub> (NCC as final product).</p> |
|         | Fig7      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <p>X-ray diffraction (XRD) pattern showing intensity on the y-axis and 2-theta on the x-axis. The chart features several peaks, with a prominent peak around 30 degrees, indicating the crystalline structure of the sample. The legend indicates the sample is precipitated calcium carbonate, with a reference to calcite.</p>                                                                                                                           |
|         | Fig8      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>Chunks of white, chalky material are piled together in a container. The pieces vary in size and shape, with some showing rough, jagged edges. The surface texture appears powdery and uneven.</p>                                                                                                                                                                                                                                                       |
|         | Fig9      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>Electron microscopy image showing a dense cluster of irregularly shaped particles. The scale bar indicates a length of 200 nanometers. The image was captured with an accelerating voltage of 5.00 kV and a working distance of 7.3 mm. The date of capture is January 29, 2020, at 15:34:04.</p>                                                                                                                                                       |

| Page no | Fig/Photo | Thumbnail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Alt-text Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Fig10     | <p>Bar chart titled "Climate change - GTP 100y" showing greenhouse gas emissions in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. The red bar represents natural gas combined cycle power plants with the highest emission at 0.037 kg CO<sub>2</sub>-eq. The blue bar shows natural gas conventional power plants at 0.027 kg CO<sub>2</sub>-eq. The yellow bar represents hard coal at 0.011 kg CO<sub>2</sub>-eq. Green and purple bars represent electricity from high voltage grids with emissions of 0.008 kg CO<sub>2</sub>-eq each. A legend at the bottom details the electricity production methods and grid locations.</p> | <p>Bar chart titled "Climate change - GTP 100y" showing greenhouse gas emissions in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. The red bar represents natural gas combined cycle power plants with the highest emission at 0.037 kg CO<sub>2</sub>-eq. The blue bar shows natural gas conventional power plants at 0.027 kg CO<sub>2</sub>-eq. The yellow bar represents hard coal at 0.011 kg CO<sub>2</sub>-eq. Green and purple bars represent electricity from high voltage grids with emissions of 0.008 kg CO<sub>2</sub>-eq each. A legend at the bottom details the electricity production methods and grid locations.</p> |
|         | Fig11     | <p>Bar chart titled "Climate change - GTP 20y" showing greenhouse gas emissions in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. The chart includes five colored bars: red (0.038 kg), blue (0.027 kg), yellow (0.026 kg), green (0.025 kg), and purple (0.012 kg). Each bar represents a specific electricity production method, detailed in the legend below the chart. The y-axis is labeled "kg CO<sub>2</sub>-Eq."</p>                                                                                                                                                                                                           | <p>Bar chart titled "Climate change - GTP 20y" showing greenhouse gas emissions in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. The chart includes five colored bars: red (0.038 kg), blue (0.027 kg), yellow (0.026 kg), green (0.025 kg), and purple (0.012 kg). Each bar represents a specific electricity production method, detailed in the legend below the chart. The y-axis is labeled "kg CO<sub>2</sub>-Eq."</p>                                                                                                                                                                                                           |
|         | Fig12     | <p>Bar chart titled "Climate change - GWP 20y" showing global warming potential over 20 years in kg CO<sub>2</sub> equivalent for different electricity production methods. Five colored bars represent various methods: red (0.038), blue (0.031), yellow (0.030), green (0.027), and purple (0.015). The legend describes each method, including natural gas and hydroelectric power, with specific regional grid cutoffs.</p>                                                                                                                                                                                                                                   | <p>Bar chart titled "Climate change - GWP 20y" showing global warming potential over 20 years in kg CO<sub>2</sub> equivalent for different electricity production methods. Five colored bars represent various methods: red (0.038), blue (0.031), yellow (0.030), green (0.027), and purple (0.015). The legend describes each method, including natural gas and hydroelectric power, with specific regional grid cutoffs.</p>                                                                                                                                                                                                                                   |

| Page no | Fig/Photo | Thumbnail                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Alt-text Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | Fig13     | <p>Bar chart titled "Climate change - GWP 100y" showing the global warming potential in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. Five bars represent various energy sources: natural gas combined cycle, natural gas conventional, hydro reservoir in tropical regions, and hard coal. The red bar (natural gas combined cycle) is the highest at 0.038 kg CO<sub>2</sub>-Eq, followed by the blue bar (natural gas conventional) at 0.027 kg CO<sub>2</sub>-Eq. The yellow, green, and purple bars represent hydro and coal, with values of 0.015, 0.014, and 0.011 kg CO<sub>2</sub>-Eq, respectively. A legend below details each energy source and its specific grid location.</p> | <p>Bar chart titled "Climate change - GWP 100y" showing the global warming potential in kg CO<sub>2</sub>-equivalent for different electricity production methods. Five bars represent various energy sources: natural gas combined cycle, natural gas conventional, hydro reservoir in tropical regions, and hard coal. The red bar (natural gas combined cycle) is the highest at 0.038 kg CO<sub>2</sub>-Eq, followed by the blue bar (natural gas conventional) at 0.027 kg CO<sub>2</sub>-Eq. The yellow, green, and purple bars represent hydro and coal, with values of 0.015, 0.014, and 0.011 kg CO<sub>2</sub>-Eq, respectively. A legend below details each energy source and its specific grid location.</p> |
|         | Fig14     | <p>Bar chart titled "CO<sub>2</sub>, fossil -Emission to air/unspecified" showing emissions in grams of CO<sub>2</sub>. Five colored bars represent different production processes: red for clinker production (1.030 grams), blue for heavy fuel oil production (0.600 grams), yellow for clinker production in Europe without Switzerland (0.560 grams), green for diesel burned in building machines (0.530 grams), and purple for pig iron production (0.330 grams). A legend below the chart identifies each process by color.</p>                                                                                                                                                                                  | <p>Bar chart titled "CO<sub>2</sub>, fossil -Emission to air/unspecified" showing emissions in grams of CO<sub>2</sub>. Five colored bars represent different production processes: red for clinker production (1.030 grams), blue for heavy fuel oil production (0.600 grams), yellow for clinker production in Europe without Switzerland (0.560 grams), green for diesel burned in building machines (0.530 grams), and purple for pig iron production (0.330 grams). A legend below the chart identifies each process by color.</p>                                                                                                                                                                                  |