

Descarbonização e Gestão Hídrica na Indústria da Borracha

Evandro Roberto Tagliaferro

Professor Doutor, UB, Brasil
evandro.tagliaferro@ub.edu.br
ORCID iD: 0000-0003-2557-031X

Danila Fernanda Rodrigues Frias

Professora Doutora, SES/MS e UB, Brasil
danila.frias@ub.edu.br
ORCID iD: 0000-0001-8621-3338

Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro

Professora Doutora, UNESP e UB, Brasil
juliana.pinheiro@ub.edu.br
ORCID iD: 0000-0001-6252-828X

Luiz Sergio Vanzela

Professor Doutor, UB, Brasil
luiz.vanzela@ub.edu.br
ORCID iD: 0000-0002-2192-9252

Descarbonização e Gestão Hídrica na Indústria da Borracha

RESUMO

Objetivo - Apresentar e analisar o inventário corporativo de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de uma empresa de beneficiamento de borracha natural, avaliando o impacto de ações de gestão climática e discutindo a interconexão entre a descarbonização e a gestão de recursos hídricos sob a ótica do nexo água-energia.

Metodologia - O estudo de caso quantificou as emissões dos Escopos 1, 2 e 3 para os anos de 2023 e 2024, utilizando 2022 como ano-base. A metodologia seguiu as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol, em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 14064 e os métodos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), contextualizando os resultados no âmbito da gestão integrada de efluentes industriais.

Originalidade/relevância - O trabalho preenche uma lacuna ao utilizar um inventário de GEE como ponto de partida para uma análise integrada dos impactos ambientais (atmosféricos e hídricos) no setor de beneficiamento de borracha, um segmento da agroindústria com uso intensivo de energia e água. A relevância reside na aplicação do conceito do nexo água-energia para discutir estratégias de sustentabilidade em um contexto operacional real.

Resultados - As emissões totais foram de 3.680,17 tCO₂e em 2023 e 3.464,52 tCO₂e em 2024. A eliminação das emissões de Escopo 2 em 2024, via aquisição de energia renovável certificada (I-REC), deslocou o foco para o Escopo 1 (97,8% do total), majoritariamente da combustão para geração de calor. A análise evidenciou que este processo energético está intrinsecamente ligado ao processo hídrico de lavagem da matéria-prima, tornando a gestão de efluentes um componente central da estratégia de sustentabilidade da planta.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo demonstra empiricamente como um inventário de GEE pode transcender a gestão climática e servir como ferramenta para uma gestão ambiental integrada, conectando a descarbonização do calor de processo à poluição e tratamento de águas. A abordagem do nexo água-energia é aplicada para contextualizar os desafios e oportunidades de mitigação.

Contribuições sociais e ambientais - A pesquisa destaca uma estratégia corporativa para a descarbonização do consumo elétrico e, ao mesmo tempo, fomenta a discussão sobre a necessidade de tecnologias limpas para processos térmicos e hídricos. Isso aponta para um caminho de redução de emissões de GEE e, simultaneamente, de mitigação da poluição hídrica, com potencial para melhorar a qualidade dos corpos d'água locais.

PALAVRAS-CHAVE: Pegada de Carbono. Agroindústria. Gestão Hídrica. Poluição Industrial. Nexo Água-Energia.

Decarbonization and Water Management in the Rubber Industry

ABSTRACT

Objective – To present and analyze the corporate Greenhouse Gas (GHG) emissions inventory of a natural rubber processing company, evaluating the impact of climate management actions and discussing the interconnection between decarbonization and water resource management from the perspective of the water-energy nexus.

Methodology – The case study quantified Scope 1, 2, and 3 emissions for the years 2023 and 2024, using 2022 as a baseline. The methodology followed the guidelines of the Brazilian GHG Protocol Program, in accordance with ABNT NBR ISO 14064 and IPCC methods, contextualizing the results within the framework of integrated industrial effluent management.

Originality/Relevance – The work fills a gap by using a GHG inventory as a starting point for an integrated analysis of environmental impacts (atmospheric and hydric) in the rubber processing sector, an agro-industrial segment with intensive energy and water use. The relevance lies in applying the water-energy nexus concept to discuss sustainability strategies in a real operational context.

Results – Total emissions were 3,680.17 tCO₂e in 2023 and 3,464.52 tCO₂e in 2024. The elimination of Scope 2 emissions in 2024, through the acquisition of certified renewable energy (I-REC), shifted the focus to Scope 1 (97.8% of the total), mainly from combustion for heat generation. The analysis showed that this energy process is intrinsically linked to the water-based process of washing raw materials, making effluent management a central component of the plant's sustainability strategy.

Theoretical/Methodological Contributions – The study empirically demonstrates how a GHG inventory can transcend climate management and serve as a tool for integrated environmental management, connecting the decarbonization of process heat to water pollution and treatment. The water-energy nexus approach is applied to contextualize mitigation challenges and opportunities.

Social and Environmental Contributions – The research highlights a corporate strategy for decarbonizing electricity consumption and, simultaneously, fosters discussion on the need for clean technologies for thermal and water processes. This points to a path of reducing GHG emissions while mitigating water pollution, with the potential to improve the quality of local water bodies.

KEYWORDS: Carbon Footprint. Agroindustry. Water Management. Industrial Pollution. Water-Energy Nexus.

Descarbonización y Gestión Hídrica en la Industria del Caucho

RESUMEN

Objetivo – Presentar y analizar el inventario corporativo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de una empresa de procesamiento de caucho natural, evaluando el impacto de acciones de gestión climática y discutiendo la interconexión entre la descarbonización y la gestión de recursos hídricos desde la óptica del nexo agua-energía.

Metodología – El estudio de caso cuantificó las emisiones de Alcance 1, 2 y 3 para los años 2023 y 2024, utilizando 2022 como año base. La metodología siguió las directrices del Programa Brasileño GHG Protocol, en conformidad con la norma ABNT NBR ISO 14064 y los métodos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), contextualizando los resultados en el ámbito de la gestión integrada de efluentes industriales.

Originalidad/Relevancia – El trabajo llena un vacío al utilizar un inventario de GEI como punto de partida para un análisis integrado de los impactos ambientales (atmosféricos e hídricos) en el sector de procesamiento de caucho, un segmento de la agroindustria con uso intensivo de energía y agua. La relevancia reside en la aplicación del concepto del nexo agua-energía para discutir estrategias de sostenibilidad en un contexto operativo real.

Resultados – Las emisiones totales fueron de 3.680,17 tCO₂e en 2023 y 3.464,52 tCO₂e en 2024. La eliminación de las emisiones de Alcance 2 en 2024, mediante la adquisición de energía renovable certificada (I-REC), desplazó el foco al Alcance 1 (97,8% del total), mayoritariamente de la combustión para generación de calor. El análisis evidenció que este proceso energético está intrínsecamente ligado al proceso hídrico de lavado de la materia prima, convirtiendo la gestión de efluentes en un componente central de la estrategia de sostenibilidad de la planta.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio demuestra empíricamente cómo un inventario de GEI puede trascender la gestión climática y servir como herramienta para una gestión ambiental integrada, conectando la descarbonización del calor de proceso con la contaminación y tratamiento de aguas. El enfoque del nexo agua-energía se aplica para contextualizar los desafíos y oportunidades de mitigación.

Contribuciones Sociales y Ambientales – La investigación destaca una estrategia corporativa para la descarbonización del consumo eléctrico y, al mismo tiempo, fomenta la discusión sobre la necesidad de tecnologías limpias para procesos térmicos e hídricos. Esto señala un camino de reducción de emisiones de GEI y, simultáneamente, de mitigación de la contaminación hídrica, con potencial para mejorar la calidad de los cuerpos de agua locales.

PALABRAS CLAVE: Huella de Carbono. Agroindustria. Gestión Hídrica. Contaminación Industrial. Nexo Agua-Energía.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias inseridas em bacias hidrográficas urbanizadas enfrentam uma dupla pressão ambiental: a necessidade de mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para combater as mudanças climáticas e, simultaneamente, gerenciar o consumo de água e a poluição de seus efluentes para proteger os recursos hídricos locais (Wang et al., 2023).

Essa interdependência é particularmente crítica na agroindústria, que responde por uma parcela significativa do consumo de água doce e das emissões de GEE (Sovacool et al., 2021; McKinsey & Company, 2023).

Nesse cenário, a abordagem do nexo água-energia surge como um arcabouço conceitual indispensável, pois reconhece que não há produção de energia sem água, nem gestão da água sem energia, e que ambos são vitais para a produção de alimentos e bens industriais (Bazilian et al., 2011; Lazaro et al., 2022).

O setor de beneficiamento de borracha natural é um exemplo emblemático desse nexo. Seus processos são intensivos, tanto no uso de energia térmica para secagem, quanto no consumo de água para a lavagem da matéria-prima (Dunuwila et al., 2024; Wijerathna et al., 2023).

O descarte inadequado dos efluentes gerados, ricos em matéria orgânica e outros poluentes, pode causar sérios impactos ambientais, como a depleção de oxigênio e a contaminação de corpos d'água (Majumder et al., 2014; Wijerathna et al., 2023).

Portanto, uma gestão ambiental verdadeiramente sustentável nesse setor exige uma visão integrada, que transcenda a análise isolada de cada impacto.

Nesse contexto, o inventário corporativo de GEE, tradicionalmente visto como uma ferramenta de gestão climática, pode ser ressignificado como um ponto de partida para uma avaliação ambiental mais ampla (Kim et al., 2024; U.S. EPA, 2020). Ao mapear as fontes de emissão, o inventário aponta os processos de maior consumo energético que, frequentemente, estão atrelados aos de maior consumo hídrico.

Este estudo tem como objetivo apresentar e analisar o inventário de emissões de GEE de uma empresa de beneficiamento de látex natural para os anos de 2023 e 2024, utilizando-o para discutir não apenas as estratégias de descarbonização, mas também suas implicações para a gestão da água e o tratamento de efluentes.

O trabalho busca, assim, conectar a mitigação de GEE à proteção das águas urbanas, demonstrando a aplicação prática do nexo água-energia na busca por uma sustentabilidade industrial integrada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o inventário corporativo de emissões de GEE de uma empresa de beneficiamento de borracha natural como ferramenta para uma gestão ambiental integrada, avaliando a eficácia das estratégias de descarbonização e discutindo a interconexão entre os processos de consumo energético, o uso de recursos hídricos e a geração de efluentes.

2.2 Objetivos Específicos

Verificar as emissões de GEE dos Escopos 1, 2 e 3 para os anos de 2023 e 2024, utilizando 2022 como ano-base.

Avaliar o impacto da aquisição de energia elétrica de fontes renováveis certificadas (I-REC) na eliminação das emissões de Escopo 2.

Identificar e analisar as fontes de emissão remanescentes no Escopo 1, com foco na combustão estacionária para geração de calor.

Discutir a relação entre o consumo de energia para secagem e o uso de água para lavagem, aplicando o conceito do nexo água-energia para conectar a gestão de GEE à gestão de efluentes.

Contextualizar os desafios de descarbonização e gestão hídrica da empresa no âmbito do setor de beneficiamento de borracha, apontando para a necessidade de uma abordagem de sustentabilidade integrada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Estrutura Metodológica para Inventários Corporativos de GEE

A quantificação e o reporte de emissões de GEE em nível corporativo são orientados por um conjunto de padrões e metodologias que visam garantir a relevância, integralidade, consistência, transparência e exatidão dos dados. A principal referência global é o *GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard*, desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (GHG Protocol, 2015). Este padrão estabelece a base para a maioria dos programas de reporte de GEE, incluindo o Programa Brasileiro GHG Protocol, e é compatível com a norma ABNT NBR ISO 14064-1.

A metodologia define, primeiramente, os limites organizacionais, que determinam quais operações são incluídas no inventário. A abordagem de controle operacional, utilizada neste estudo, atribui 100% das emissões das operações sobre as quais a empresa tem controle direto (TAGLIAFERRO; BRESSAN, 2025). Em seguida, definem-se os limites operacionais, que categorizam as emissões em três escopos distintos para evitar a dupla contagem e proporcionar uma visão abrangente da pegada de carbono da organização (GHG Protocol, 2015):

- **Escopo 1:** Emissões diretas de fontes que pertencem ou são controladas pela empresa. Incluem a combustão em fontes estacionárias (caldeiras, fornos) e móveis (frota de veículos), emissões de processo e emissões fugitivas.
- **Escopo 2:** Emissões indiretas provenientes da geração de energia elétrica, vapor, calor ou refrigeração que é adquirida e consumida pela empresa. Embora a geração ocorra em instalações não controladas pela organização, as emissões são um resultado direto de seu consumo energético.
- **Escopo 3:** Todas as outras emissões indiretas que ocorrem na cadeia de valor da empresa, tanto a montante (upstream) quanto a jusante (downstream). Exemplos incluem a extração e produção de materiais comprados, o transporte e distribuição,

as viagens de negócios, o deslocamento dos colaboradores e o tratamento de resíduos.

3.2 Emissões de Escopo 2 e o Papel dos Certificados de Energia Renovável (I-RECs)

A contabilização das emissões de Escopo 2 foi significativamente aprimorada com a publicação da *GHG Protocol Scope 2 Guidance* (GHG PROTOCOL, 2015). Esta orientação introduziu uma exigência de dupla-reportagem para empresas que operam em mercados com instrumentos contratuais disponíveis: o método baseado na localização (*location-based*) e o método baseado no mercado (*market-based*).

O método *location-based* reflete a intensidade média de emissões da rede elétrica onde o consumo ocorre. Em contraste, o método *market-based* permite que as empresas contabilizem as emissões da eletricidade que escolheram adquirir especificamente, por meio de instrumentos contratuais (GHG Protocol, 2015).

O principal instrumento para substantiar as alegações de consumo de energia renovável no método *market-based* são os Certificados de Atributo de Energia (CAE), dos quais o Certificado Internacional de Energia Renovável (I-REC) é o padrão mais difundido globalmente (Maldonado, 2022).

Cada I-REC representa a prova de que 1 MWh de eletricidade foi gerado a partir de uma fonte renovável e injetado na rede. Ao adquirir e cancelar (aposentar) I-RECs em quantidade equivalente ao seu consumo, uma empresa pode, segundo o GHG Protocol, reportar emissões de Escopo 2 iguais a zero para aquele volume de eletricidade (GHG Protocol, 2015).

No Brasil, o mercado de I-RECs tem experimentado um crescimento exponencial, impulsionado pela demanda corporativa para cumprir metas de sustentabilidade, alinhar-se a iniciativas globais como a RE100 e comunicar de forma verificável seu compromisso com a descarbonização. Embora a matriz elétrica brasileira já seja predominantemente renovável, a aquisição de I-RECs serve como um sinal de mercado que direciona investimentos e cria fluxos de receita adicionais para novos projetos de energia renovável, além de fornecer um mecanismo padronizado e reconhecido internacionalmente para que as empresas evitem acusações de *greenwashing*. Contudo, a expansão deste mercado voluntário evidencia desafios estruturais, como a coexistência de múltiplos sistemas de certificação sem um registro centralizado, o que suscita debates sobre o risco de dupla contagem e a necessidade de um arcabouço regulatório nacional (Grunwald, 2024; Maldonado, 2022).

3.3 Desafios e Oportunidades na Descarbonização do Calor de Processo Industrial (Escopo 1)

Para muitas indústrias, especialmente após a neutralização das emissões de Escopo 2, o desafio mais complexo e capital-intensivo reside na descarbonização do calor de processo, que constitui a maior parte das emissões de Escopo 1 (Rissman et al., 2020; IPCC, 2022).

O calor industrial é necessário em uma vasta gama de temperaturas e processos, e sua geração tem sido historicamente dominada pela queima de combustíveis fósseis devido ao baixo custo e à alta densidade energética (IPCC, 2022).

Segundo Rissman et al. (2020), as principais vias tecnológicas para a descarbonização da combustão estacionária incluem:

1. **Eficiência Energética:** A otimização de processos e a recuperação de calor residual são as medidas mais imediatas e, frequentemente, as de menor custo para reduzir o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões.
2. **Eletificação:** Substituir queimadores a combustíveis fósseis por tecnologias elétricas, como bombas de calor industriais de alta temperatura, caldeiras elétricas ou aquecimento por resistência e indução. A viabilidade desta via depende da disponibilidade de eletricidade renovável a preços competitivos e da capacidade das tecnologias de atingir as temperaturas de processo necessárias (Santos; Lora; Mendes, 2022; Muñoz-Maldonado; Correa-Quintana; Ospino-Castro, 2023; Durga et al., 2024).
3. **Troca de Combustíveis:** Substituir combustíveis fósseis como gás natural, GLP ou diesel por alternativas de menor intensidade de carbono, como biomassa sustentável (pellets, cavacos), biogás ou, futuramente, hidrogênio verde. Esta abordagem requer a avaliação da disponibilidade, logística e sustentabilidade da nova fonte de combustível, bem como adaptações nos equipamentos de combustão (Mignogna et al., 2024; Fathi et al., 2024).
4. **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS):** Uma opção para processos em que a combustão de fósseis é difícil de eliminar. No entanto, é uma tecnologia de alto custo e ainda em desenvolvimento para muitas aplicações em menor escala (Rissman et al., 2020).

A escolha da estratégia ideal depende de uma análise complexa que envolve fatores técnicos (temperatura do processo), econômicos (custo de capital e operacional), logísticos (disponibilidade de combustível ou infraestrutura elétrica) e regulatórios.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto deste estudo é o inventário de emissões de GEE de uma unidade industrial de beneficiamento de borracha natural localizada no noroeste paulista, Brasil.

O processo produtivo consiste na transformação de coágulos de borracha *in natura* no composto granulado escorrido de borracha (GEB-10). Este processo é intensivo no uso de água, especialmente nas etapas de lavagem e trituração da matéria-prima, gerando um volume significativo de efluente líquido industrial que requer tratamento (Dunuwila et al., 2024; Wijerathna et al., 2023). Na sequência, o material passa por secagem e prensagem, etapas de alto consumo energético.

O estudo abrange os períodos anuais de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2023 e de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2024, utilizando os dados consolidados do ano de 2022 como linha de base para a análise comparativa.

A metodologia para a quantificação e o reporte das emissões seguiu estritamente as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol, compatíveis com a norma ABNT NBR ISO 14064-1 e

os métodos propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os limites organizacionais foram definidos pela abordagem de controle operacional, na qual a empresa se responsabiliza por 100% das emissões das operações sob seu controle direto (Tagliaferro; Bressan, 2025).

Os limites operacionais foram categorizados nos três escopos, conforme detalhado a seguir:

- **Escopo 1 (Emissões Diretas):** Foram quantificadas as emissões provenientes de fontes controladas pela organização, incluindo:
 - **Combustão Estacionária:** Consumo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e óleo diesel nos secadores de borracha e em geradores de energia de emergência.
 - **Combustão Móvel:** Consumo de diesel pela frota de veículos (caminhões) e equipamentos móveis (pás-carregadeiras) de propriedade da empresa.
 - **Emissões Fugitivas:** Perdas de gás de extintores de incêndio à base de CO₂ durante recargas.
 - **Tratamento de Efluentes:** Emissões de Metano (CH₄) e Óxido Nitroso (N₂O) provenientes do sistema de tratamento de efluentes líquidos industriais, um ponto de conexão direto com a gestão hídrica da planta.
- **Escopo 2 (Emissões Indiretas da Energia Adquirida):** Foram contabilizadas as emissões decorrentes da aquisição de energia elétrica. Para 2022 e 2023, considerou-se a compra de eletricidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). Para 2024, a contabilização seguiu o método baseado em mercado, considerando a aquisição de energia com certificação de origem renovável (I-REC).
- **Escopo 3 (Outras Emissões Indiretas):** Neste estudo, o escopo foi limitado às seguintes categorias, consideradas as mais relevantes para a operação:
 - **Deslocamento Casa-Trabalho:** Emissões do transporte dos colaboradores.
 - **Tratamento de Resíduos Sólidos:** Emissões provenientes da disposição final dos resíduos gerados na operação.

Os dados de atividade, como consumo de combustíveis (em litros), consumo de energia elétrica (em MWh), volume de resíduos (em toneladas) e dados da frota e dos colaboradores, foram coletados a partir de registros internos da empresa, incluindo faturas de fornecedores, relatórios de consumo dos equipamentos e planilhas de controle operacional.

Os fatores de emissão utilizados para os cálculos foram obtidos de fontes reconhecidas, primariamente da ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro GHG Protocol e, complementarmente, de publicações do IPCC.

As emissões dos gases CO₂, CH₄ e N₂O foram quantificadas para cada fonte e, posteriormente, convertidas para a unidade padrão de Dióxido de Carbono equivalente (tCO₂e).

Para essa conversão foram utilizados os Potenciais de Aquecimento Global (PAG) do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, que estabelecem os valores de 28 para o CH₄ e 265 para o N₂O em um horizonte de 100 anos.

As emissões biogênicas, quando aplicável, foram contabilizadas separadamente e não foram incluídas nos totais dos escopos, conforme a prática padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Perfil de Emissões e a Eficácia da Estratégia de Descarbonização do Escopo 2

A análise consolidada dos inventários de GEE da empresa revela uma trajetória de redução nas emissões totais de 3.879,82 tCO₂e em 2022 para 3.464,52 tCO₂e em 2024, o que representa uma queda de 5,8% em relação a 2023 e de 10,7% em relação ao ano-base.

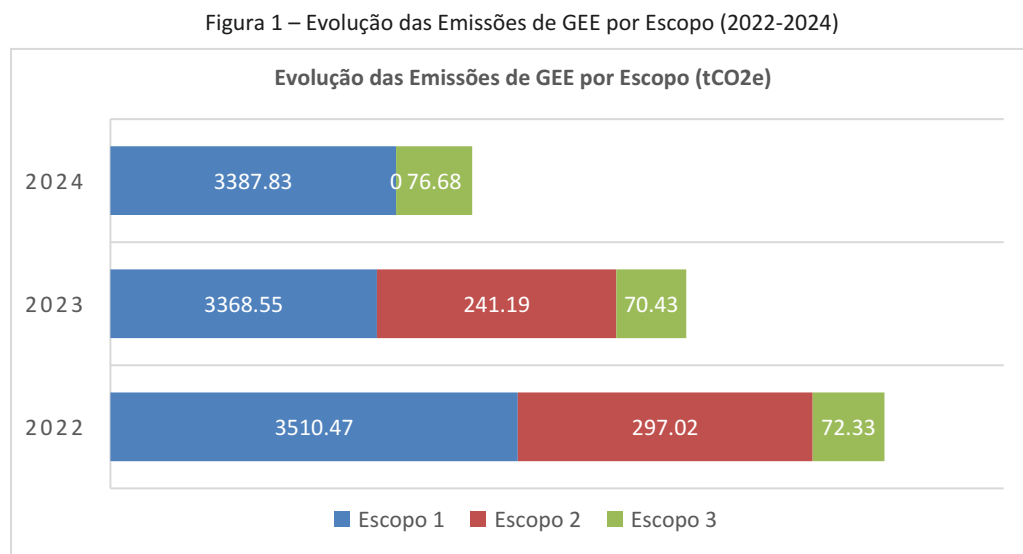
A Tabela 1 apresenta a distribuição das emissões por escopo ao longo do período analisado.

Tabela 1 - Emissões de GEE (tCO₂e) por escopo nos anos de 2022, 2023 e 2024.

Escopo	2022 (tCO ₂ e)	2023 (tCO ₂ e)	2024 (tCO ₂ e)
Escopo 1	3.510,47	3.368,55	3.387,83
Escopo 2	297,02	241,19	0,00
Escopo 3	72,33	70,43	76,68
Total	3.879,82	3.680,17	3.464,52

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 1 apresenta essa evolução, destacando a queda nas emissões totais e a eliminação das emissões de Escopo 2 em 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O resultado mais proeminente e de maior impacto estratégico observado no período foi a completa eliminação das emissões de Escopo 2 no ano de 2024. Essa redução de 241,19 tCO₂e em relação ao ano anterior foi alcançada por meio de uma ação de gestão deliberada: a aquisição de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, comprovada pelo cancelamento de Certificados

Internacionais de Energia Renovável (I-RECs) em volume equivalente ao consumo total da planta.

Esta prática está em total conformidade com a abordagem baseada em mercado preconizada pela *GHG Protocol Scope 2 Guidance*, que permite às empresas reportarem emissões zero para a eletricidade cujo atributo renovável foi explicitamente adquirido (GHG Protocol, 2015).

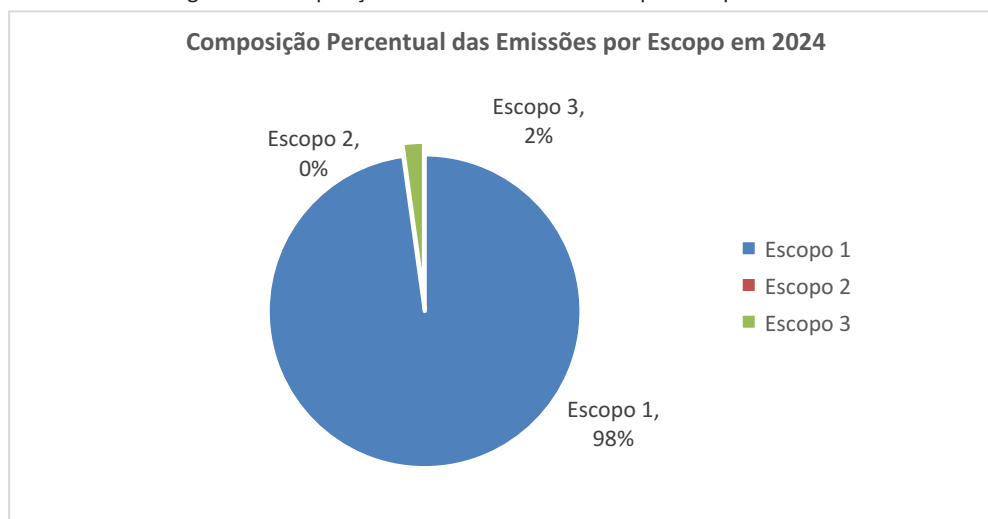
A decisão da empresa reflete uma tendência crescente no setor corporativo brasileiro. O mercado de I-RECs tem se expandido rapidamente, após um crescimento expressivo no período 2020-2021, o mercado continuou sua trajetória de expansão nos anos subsequentes, consolidando-se como o principal mecanismo voluntário para a comprovação do consumo de energia renovável por parte das corporações no país (Grunwald, 2024).

Essa expansão é impulsionada pela necessidade das empresas de atenderem a metas de sustentabilidade, responderem à pressão de investidores e consumidores e substanciarem suas alegações ambientais de forma verificável, evitando o *greenwashing* (Maldonado, 2022).

A estratégia adotada pela empresa, portanto, não apenas resultou em uma redução quantificável em sua pegada de carbono, mas também a alinhou com as melhores práticas de gestão climática corporativa, demonstrando um compromisso tangível com a transição energética.

Uma consequência direta e estratégica da neutralização do Escopo 2 é a reconfiguração do perfil de emissões da empresa. As emissões de Escopo 1, que já eram dominantes, passaram de 90,5% do total em 2022 para 97,8% em 2024, como demonstrado na Figura 2. Essa mudança não é apenas numérica; ela representa um deslocamento fundamental do foco estratégico da descarbonização.

Figura 2 – Composição Percentual das Emissões por Escopo em 2024



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Resolvida a questão das emissões de eletricidade, por meio de uma solução de mercado, o desafio central e inadiável da empresa agora, sob a óptica das emissões de GEE, reside exclusivamente na mitigação de suas emissões diretas, oriundas de seus próprios processos produtivos.

O inventário, nesse sentido, cumpriu seu papel de ferramenta diagnóstica, apontando com clareza onde os próximos esforços e investimentos devem ser concentrados.

5.2 Análise Crítica das Emissões de Escopo 1 e Vias Tecnológicas para Mitigação

A análise das emissões de Escopo 1, apresentada na Tabela 2, revela a fonte primária do desafio de descarbonização da empresa.

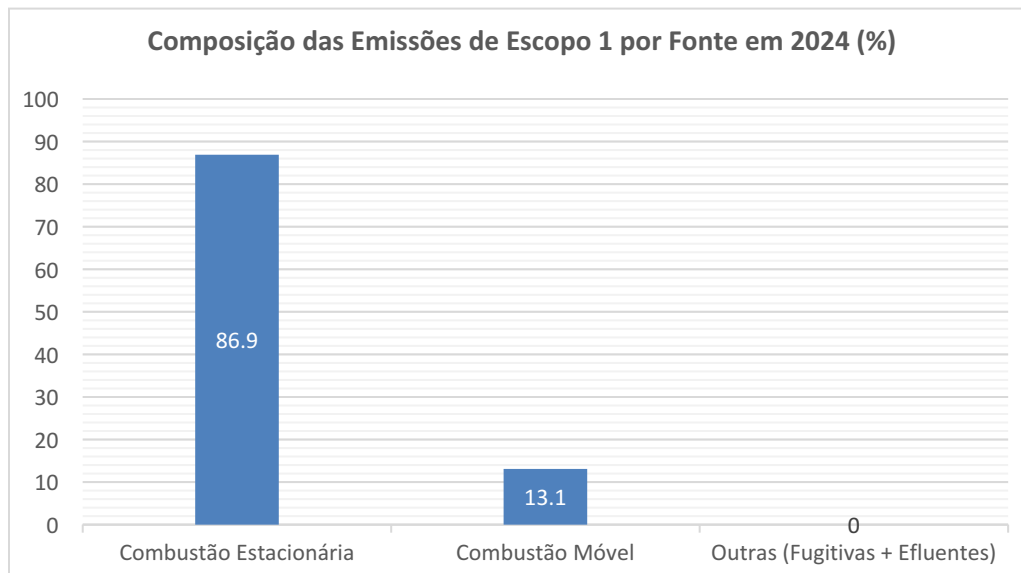
Tabela 2 - Detalhamento das emissões (tCO₂e) de Escopo 1 por fonte em 2023 e 2024.

Fonte de Emissão (Escopo 1)	2023 (tCO ₂ e)	2024 (tCO ₂ e)
Combustão Estacionária	2.672,85	2.944,13
Combustão Móvel	695,63	443,68
Emissões Fugitivas	0,06	0,018
Efluentes	0,001	0,001
Total Escopo 1	3.368,55	3.387,83

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os dados demonstram inequivocamente que a combustão estacionária, associada à queima de GLP e diesel para a geração de calor nos secadores de borracha, é a fonte predominante, respondendo por aproximadamente 87% das emissões diretas em 2024 (Figura 3).

Figura 3 – Composição das Emissões de Escopo 1 por Fonte em 2024



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Este cenário é típico de muitas indústrias, nas quais o calor de processo representa a fronteira mais complexa para a descarbonização, sendo tecnicamente mais desafiador e custoso de abater do que as emissões associadas à eletricidade (IPCC, 2022).

O inventário direciona, assim, o foco estratégico da empresa para a avaliação de vias tecnológicas alternativas para seus secadores. As opções, amplamente discutidas na literatura

científica, incluem a substituição do GLP por fontes de menor intensidade de carbono, como biomassa ou biogás, ou a eletrificação dos processos, aproveitando a matriz elétrica agora 100% renovável da empresa (Rissman et al., 2020).

A primeira via, a **eletrificação do calor de processo**, aproveitaria a matriz elétrica agora 100% renovável da empresa. A tecnologia mais promissora para esta aplicação são as bombas de calor industriais de alta temperatura, que podem atingir a eficiência energética de forma significativa.

A literatura científica aponta a eletrificação via bombas de calor industriais de alta temperatura como uma via tecnológica promissora para a descarbonização do calor de processo (Santos; Lora; Mendes, 2022). Aplicações internacionais em setores análogos, como o de laticínios, já demonstram a viabilidade técnica para fornecer calor em temperaturas superiores a 200 °C, com potenciais de economia de energia que podem ultrapassar 60% em comparação com sistemas baseados em combustão, representando um potencial relevante a ser explorado pela indústria nacional. A adoção dessa tecnologia, no entanto, implica um alto investimento de capital (CAPEX). Sua viabilidade econômica depende de fatores como o preço relativo da eletricidade em relação ao GLP e a existência de políticas de incentivo ou de precificação de carbono que favoreçam tecnologias de baixa emissão (Muñoz-Maldonado; Correa-Quintana; Ospino-Castro, 2023).

A segunda via, a **substituição por combustíveis renováveis**, envolveria a adaptação dos secadores para operar com biomassa sustentável (como cavacos ou pellets de madeira) ou biogás. A biomassa, em particular, é uma alternativa atraente no contexto do agronegócio brasileiro, pois pode valorizar resíduos agrícolas ou florestais locais, promovendo uma economia circular (Mignogna et al., 2024; Fathi et al., 2024). O biogás, gerado a partir da digestão anaeróbia de efluentes da própria indústria ou de resíduos agropecuários da região, também representa uma opção com sinergias locais (Fathi et al., 2024).

Contudo, essa rota introduz novos desafios. A transição para a biomassa exige a gestão de uma nova cadeia de suprimentos, com garantia de sustentabilidade, logística de transporte e armazenamento, além de um controle mais rigoroso das emissões de poluentes atmosféricos locais, como material particulado (Mignogna et al., 2024).

5.3 Gestão de Emissões e Gestão Hídrica: Uma Análise sob a Ótica do Nexa Água-Energia

A análise do inventário de GEE, quando contextualizada no processo produtivo, revela uma profunda interconexão entre o consumo de energia e o de água, alinhada ao conceito do nexa água-energia (Bazilian et al., 2011; Lazaro et al., 2022).

Conforme indicado na Tabela 2, as emissões provenientes do tratamento de efluentes, embora numericamente pequenas em termos de tCO₂e, são um indicador fundamental da pegada hídrica da operação.

O processo de beneficiamento da borracha natural consome volumes significativos de água, estimados entre 50 a 60 m³ por tonelada de produto, principalmente para a lavagem da matéria-prima e limpeza dos equipamentos (Wijerathna et al., 2023).

Este uso intensivo de água resulta na geração de efluentes com alta carga de poluentes, como demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos

suspensos e nitrogênio, que, se não tratados adequadamente, representam um risco significativo para os corpos d'água receptores (Majumder et al., 2014; Wijerathna et al., 2023).

A gestão desses efluentes é, portanto, um pilar da sustentabilidade do setor, tão relevante quanto a gestão das emissões atmosféricas.

O nexo se torna evidente ao observar que a principal fonte de emissões de Escopo 1 – a combustão estacionária para secagem – está diretamente ligada à etapa anterior de lavagem, que é intensiva em água. Uma gestão integrada poderia, por exemplo, explorar como a otimização do uso da água na lavagem poderia reduzir a umidade do material, diminuindo a demanda energética (e as emissões de GEE) na secagem.

A adoção de uma gestão ambiental integrada (IEM), que considera os impactos em diferentes meios (ar, água, solo) de forma conjunta, é uma tendência para indústrias que buscam a sustentabilidade real (Kim et al., 2024).

A proatividade da empresa em zerar suas emissões de Escopo 2 demonstra uma maturidade em gestão climática que pode ser expandida para a gestão hídrica.

Assim como a empresa buscou uma solução de mercado (I-RECs) para a eletricidade, os próximos passos poderiam incluir investimentos em tecnologias avançadas de tratamento de efluentes, como sistemas de membranas ou processos oxidativos avançados, que não apenas garantem a conformidade ambiental, mas também abrem a possibilidade de reuso da água no processo, diminuindo a captação e o descarte e fechando o ciclo dentro da planta (Dunuwila et al., 2025; Wijerathna et al., 2023).

5.4 Contextualização do Desempenho Ambiental em Relação ao Setor

Para contextualizar o desempenho da planta é útil comparar sua intensidade de emissões com benchmarks do setor de processamento de borracha natural. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) fornecem valores de referência para a pegada de carbono de diferentes tipos de borracha processada. Jawjit, Kroeze e Rattanapan (2010) indicam que a produção de borracha em bloco (block rubber), similar ao GEB-10 produzido pela empresa, tem uma pegada de carbono de aproximadamente 0,70 tCO₂e por tonelada de produto. Estudo de caso na Libéria, por exemplo, reportou um valor menor, de 0,39 tCO₂e por tonelada de produto, destacando a influência das práticas agrícolas e da matriz energética local (Antonanzas; Quinn, 2024).

Embora os dados de produção da empresa em estudo não estejam no escopo deste artigo, uma análise preliminar baseada em sua capacidade produtiva sugere que sua intensidade de emissões está alinhada com esses benchmarks internacionais. Isso indica que o desafio da alta dependência de combustíveis fósseis para a geração de calor (secadores) não é uma particularidade desta planta, mas uma característica intrínseca ao processo produtivo do setor.

Portanto, as vias de mitigação abordadas neste estudo – eletrificação e troca de combustíveis – não são relevantes apenas para este caso específico, mas representam as principais alavancas de descarbonização para a indústria de beneficiamento de borracha como um todo. A experiência e os aprendizados da empresa em sua transição podem, assim, gerar conhecimento valioso para todo o setor.

6 CONCLUSÃO

O inventário corporativo de GEE é uma ferramenta estratégica que transcende a mera quantificação da pegada de carbono, servindo como um diagnóstico para uma gestão ambiental integrada. Sua análise permitiu avaliar a eficácia de ações de mitigação e direcionar os próximos passos da jornada de sustentabilidade da empresa, conectando a descarbonização atmosférica à gestão de recursos hídricos.

O impacto positivo da transição para o consumo de energia elétrica 100% renovável, que eliminou as emissões de Escopo 2 em 2024, comprova que a ação adotada pela empresa se alinha às melhores práticas de mercado. Contudo, a análise também revelou que o desafio remanescente está concentrado nas emissões de Escopo 1, oriundas da combustão para geração de calor.

A aplicação da perspectiva do nexo água-energia evidenciou que este desafio energético está intrinsecamente ligado ao uso intensivo de água no processo. O inventário, ao apontar para a combustão como ponto crítico, indiretamente proporciona a clara visão quanto a necessidade de otimizar também o ciclo da água, desde a captação até o tratamento, e potencial reuso dos efluentes. Uma abordagem de gestão integrada, que considere os impactos cruzados entre os meios é fundamental.

As futuras estratégias da empresa devem, portanto, focar não apenas nas vias tecnológicas para descarbonizar o calor de processo, mas também em como essas vias se integram a uma gestão hídrica mais eficiente e sustentável. O monitoramento contínuo por meio de inventários anuais, enriquecido com indicadores de uso da água e qualidade de efluentes será fundamental para consolidar o compromisso da empresa com uma economia de baixo carbono e com a proteção dos ecossistemas aquáticos locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZILIAN, M.; ROGNER, H.; HOWELLS, M.; HERMANN, R.; ARENT, D.; GIEN, D.; STEDUTO, P.; MUELLER, A.; KOMOR, P.; TOL, R. S. J.; YUMKELLA, K. K. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, v. 39, n. 12, p. 7896-7906, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>

ANTONANZAS, J., QUINN, J.C. Carbon footprint assessment of natural rubber derived from Liberian hevea trees. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13762-024-05678-6>

DUNUWILA, P.; MUNASINGHE, E.; RODRIGO, V. H. L.; GONG, W. T.; DAIGO, I.; GOTO, N. Revealing the Environmental Footprint of Crepe Rubber Production: A Comprehensive Life Cycle Assessment of a Crepe Rubber Factory in Sri Lanka. *Sustainability*, v. 17, n. 3, p. 1239, 2025. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su17031239>

DURGA, S.; SPEIZER, S.; ZHAO, X.; WALDOFF, S.; EDMONDS, J. Pathways for the US food processing sector under economy-wide net zero in a multisector dynamic framework. *Energy and Climate Change*, v. 5. 100150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100150>

FATHI, S.; MIGNOGNA, D.; SZABÓ, M.; CECI, P.; AVINO, P. Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability*, v. 16, n. 16, p. 7036, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su16167036>

GHG PROTOCOL. **GHG Protocol Scope 2 Guidance**: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. Washington, DC: World Resources Institute, 2015. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/scope-2-guidance>. Acesso em: 10 ago. 2025.

GRUNWALD, V. H. **Certificados de energia renovável na transição energética do Brasil: um estudo comparativo com os casos da Europa e dos Estados Unidos**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106133/tde-25032025-131237/publico/Certificados_de_Energia_Renovavel_na_Transicao_Energetica_do_Brasil_2025rev.pdf. Acesso em: 10 ago. 2025.

IPCC. **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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157926>

JAWJIT, W.; KROEZE, C.; RATTANAPAN, S. Greenhouse gas emissions from the rubber industry in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 5, p. 403-411, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.003>

KIM, H.; LEE, S.; CHOI, W.; LEE, S. Development and Application of an Integrated Environmental Management Education Program in Korea. *Sustainability*, v. 16, n. 5, p. 2140, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su16052140>

LAZARO, A.; GIATTI, L. L.; REIS, J. A. F. D.; CUNHA, M. A. Ten Years of Research on the Water-Energy-Food Nexus: An Analysis of Topics Evolution. *Frontiers in Water*, v. 4, p. 859891, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/frwa.2022.859891>

MAJUMDER, A.; SAHA, T.; SARKAR, S.; DE, T. K. Environmental Impact of Rubber Plantation: Ecological Vs. Economical Perspectives. *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*, v. 2, n. 8, p. 656-661, 2014.

MALDONADO, F. What you need to know about the rise of I-RECs in Brazil. *Atlas Renewable Energy*, 7 dez. 2022. Disponível em: <https://www.atlasrenewableenergy.com/news-and-insights/what-you-need-to-know-about-the-rise-of-i-recs-in-brazil>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MCKINSEY & COMPANY. The agricultural transition: Building a sustainable future. *McKinsey & Company Report*, 27 jun. 2023.

MIGNOGNA, D.; SZABÓ, M.; CECI, P.; AVINO, P. Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability*, v. 16, n. 16, p. 7036, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su16167036>

MUÑOZ-MALDONADO, Y.; CORREA-QUINTANA, E.; OSPINO-CASTRO, A. Electrification of Industrial Processes as an Alternative to Replace Conventional Thermal Power Sources. **Energies**, v. 16, n. 19, p. 6894, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/en16196894>

RISSMAN, J.; BATAILLE, C.; MASANET, E. R.; ADEN, N.; MORROW III, W. R.; ZHOU, N.; ELLIOTT, R. R. N.; DELL, R.; HEEREN, N.; HUCKESTEIN, B.; CRESKO, J.; MILLER, S. A.; ROY, J.; FENNELL, P.; CREMMINS, B.; BLANK, T. K.; HONE, D.; WILLIAMS, E. D.; DE LA RUE DU CAN, S.; SISSON, B.; WILLIAMS, M.; KATZENBERGER, J.; BURTRAW, D.; SETHI, G.; PING, H.; DANIELSON, D. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. **Applied Energy**, v. 266, p. 114848, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>

SANTOS, I. F. S.; LORA, E. E. S.; MENDES, F. E. Descarbonização do setor industrial: uma revisão das principais tecnologias. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e581111436621, 2022.

SOVACOO, B. K.; BAZILIAN, M.; GRIFFITHS, S.; KIM, J.; FOLEY, A.; ROONEY, D. Decarbonizing the food and beverage industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110856, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110856>

TAGLIAFERRO, E. R.; BRESSAN, A. **Inventário Corporativo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) 2023 e 2024**. São José do Rio Preto, SP: Etagli Ambiental Engenharia de Soluções Ltda, jun. 2025.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Corporate GHG Inventorying and Target-Setting Self-Assessment**. Washington, D.C., 2020.

WANG, Y.; ZHANG, W.; NIU, S.; ZHANG, Z.; WANG, L. Evaluation for the nexus of industrial water-energy-pollution: Performance indexes, scale effect, and policy implications. **Environmental Science & Policy**, v. 144, p. 88-98, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.007>

WIJERATHNA, W. S. M. S. K.; MANAGE, P. M.; ARACHCHIGE, U. S. P. R. Imperative assessment on the current status of rubber wastewater treatment: A review. **Chemosphere**, v. 338, p. 139512, 2023. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139512>

Dunuwila, P.; Rodrigo, V.H.L.; Daigo, I.; Goto, N. Unveiling the Environmental Impacts of Concentrated Latex Manufacturing in Sri Lanka through a Life Cycle Assessment. **Resources**, v. 13, n. 5, p. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources13010005>

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Curadoria de Dados:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Análise Formal:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Aquisição de Financiamento:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Investigação:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Metodologia:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Redação - Rascunho Inicial:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Redação - Revisão Crítica:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Revisão e Edição Final:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.
- **Supervisão:** Evandro Roberto Tagliaferro; Danila Fernanda Rodrigues Frias; Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Luiz Sergio Vanzela.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Evandro Roberto Tagliaferro, Danila Fernanda Rodrigues Frias, Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro e Luiz Sergio Vanzela**, declaramos que o manuscrito intitulado "**Descarbonização e Gestão Hídrica na Indústria da Borracha**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-