

EFEITO DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS SOBRE O BALANÇO DE CARBONO NO CICLO DE VIDA DA CANA DE AÇÚCAR

Fred Newton da Silva Souza¹, Heverthon de Paula Garcias², Juliana Mariano Alves³

RESUMO:

Este estudo avaliou o ciclo de vida (ACV) da produção agrícola de cana-de-açúcar na Usina BP Bunge, em Pedro Afonso - TO (safra 2023/24), comparando o manejo convencional (fertilizante NPK) com um manejo alternativo que substitui o fertilizante pela remineralização de solos. As emissões de GEE foram calculadas com base em fatores IPCC/Ecoinvent e processadas no software OpenLCA. Os resultados mostram que o manejo convencional emitiu 15% mais CO₂eq que o alternativo, sendo os combustíveis a principal fonte de impacto em ambos os manejos. Considerando o potencial de remoção de carbono do remineralizador (0,234 t CO₂eq t⁻¹), o manejo alternativo reduziu em 46,8% as emissões líquidas por hectare. A adoção da remineralização de solos em toda a área cultivada com cana-de-açúcar (35 mil ha), o potencial de remoção chegaria a cerca de 32 mil créditos de carbono por ano. Conclui-se que a remineralização é uma tecnologia de remoção de carbono eficaz para mitigar as emissões da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: remineralização de solos; cana-de-açúcar; balanço de carbono.

EFFECT OF SOIL REMINERALIZATION ON THE CARBON BALANCE IN THE SUGARCANE LIFE CYCLE

ABSTRACT:

This study assessed the life cycle (LCA) of sugarcane agricultural production at the BP Bunge plant in Pedro Afonso - TO (2023/24 harvest), comparing conventional management (NPK fertilizer) with an alternative management using soil remineralization instead of soluble fertilizer. GHG emissions were estimated using IPCC/Ecoinvent factors and processed in OpenLCA software. Results show conventional management emitted 15% more CO₂eq than the alternative, with fuel consumption as the main impact source in both systems. Considering the remineralizer's carbon removal potential (0,234 t CO₂eq t⁻¹), the alternative management achieved a 46,8% net emission reduction per hectare. Scaled to the total cultivated area (35.000 ha), the removal potential could reach approximately 32.000 carbon credits per year. The findings indicate that soil remineralization is an effective greenhouse gas removal technology for mitigating sugarcane production emissions.

Keywords: soil remineralization; sugarcane; carbon balance.

¹Doutor em Geologia. Pesquisador do Núcleo de Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho Ambiental, da Universidade Estadual do Tocantins - NUDAM/Unitins, Palmas-TO; fred.ns@unitins.br; <https://orcid.org/0000-0001-6961-9299>. ² Acadêmico de Engenharia Agrônoma, Técnico em Controle Ambiental – NUDAM/Unitins; heverthongarcias@unitins.br; <https://orcid.org/0000-0001-0315-5949>. ³ Doutora em Desenvolvimento Regional, Pesquisadora - NUDAM/UNITINS; juliana.ma@unitins.br; <https://orcid.org/0000-0002-7322-342X>.

INTRODUÇÃO

Os evidentes impactos associados às mudanças no clima têm imposto a necessidade de revisão geral das bases do padrão de desenvolvimento econômico mundial, especialmente em relação ao uso dos recursos naturais e às fontes de energia.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2019) ressalta que os fenômenos extremos climáticos como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades registrados em todo o mundo devem se tornar cada vez mais comuns. E acrescenta, que para minimizar os impactos e se adaptar às mudanças é necessário que os países iniciem, quanto antes, a adoção de medidas e ações de enfrentamento das consequências das mudanças climáticas.

O Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (2016) atesta que um dos grandes desafios para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, limitar o aquecimento global, impõem não somente evitar emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas também, promover a adoção de medidas capazes de remover ou capturar esses gases, reduzindo assim a concentração desses na atmosfera.

Para Fuss et al. (2018) essas medidas ou ações são denominadas tecnologias de remoção de gases de efeito estufa, ou greenhouse gas removal technology (GGRT). De acordo com os autores as GGRTs podem assumir inúmeras formas ou abordagens, desde novas tecnologias até práticas de uso e manejo das terras, e enfatizam a necessidade de compreender cada abordagem GGRT, incluindo custos, recursos utilizados (terra, energia, água etc), extensão dos benefícios locais e dos impactos negativos, e a prontidão tecnológica.

O uso dos biocombustíveis constitui importante ação para reduzir as emissões de GEE. De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2021), a cana-de-açúcar é a principal fonte de energia renovável do país, ou seja, 19% da oferta interna e 39% de toda a energia renovável utilizada no Brasil. Mas, os biocombustíveis também emitem GEE, e como bem apontam Bordonal et al. (2018), em ampla revisão sobre a sustentabilidade da produção de

cana-de-açúcar no Brasil, cerca de 80% das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol de cana têm origem na fase agrícola, com destaque para os fertilizantes nitrogenados e o consumo de combustíveis fósseis nas operações mecanizadas. Para Funes (2016) o etanol de cana de açúcar pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas quanto mais eficazes se tornam as práticas de manejo agrícola adotadas.

A rochagem ou remineralização é considerada uma tecnologia GGRT que consiste na aplicação de rochas silicáticas moídas diretamente no solo. De acordo com Beerling et al. (2018) a técnica é denominada intemperismo aprimorado de rochas, *enhanced weathering rocks* (EWR), cujo potencial de captura de carbono depende do tipo de rocha, da granulometria do produto e da taxa de aplicação (Taylor et al., 2017).

Desde 2006 o Núcleo de Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho Ambiental (NUDAM/UNITINS) desenvolvem pesquisas de avaliação de diferentes estratégias de uso de remineralizadores de solos, cuja eficiência agronômica tem se comprovado em variados manejos e cultivos (Borges et al., 2023; Souza et al., 2017; 2026). O produto remineralizador de solos produzido pela Calcário Milenium, registrado no MAPA, é objeto de dois outros projetos em andamento, ou seja, avaliação do ciclo de vida e do potencial de remoção de carbono de remineralizadores de solos, e avaliação de blends de agrominerais regionais, ambos apoiados pelo CNPq. Esse último projeto inclui um experimento de avaliação dos efeitos comparativos de diferentes estratégias de uso do remineralizador de solos em comparação ao manejo convencional com fertilização NPK na produção de cana de açúcar.

A avaliação do ciclo de vida (ACV), *life cycle assessments* (LCA), é uma ferramenta que permite inferir os potenciais impactos de um produto em toda sua cadeia produtiva, desde sua obtenção até o descarte final. No Brasil é regida pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044. A literatura é bastante abundante no que diz respeito a utilização da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) no cultivo agrícola da cana-de-açúcar, como também nos processos industriais de produção de álcool e demais derivados.

Como bem apontam Gnansounou et al. (2008), os estudos de ACV para combustíveis ou biocombustíveis podem incluir todas as etapas desde a extração ou produção de matérias primas até o abastecimento do veículo (*well-to-tank* ou “do poço ao tanque”) ou até o efetivo consumo do combustível (*well-to-wheel* ou “do poço à roda”). Mas como sugerem os autores, outras abordagens podem ser utilizadas em função dos objetivos da pesquisa, tal como a proposta do presente estudo que compreende apenas a etapa de produção agrícola de matéria prima (*cradle-to-gate* ou “do berço ao portão da fábrica”).

Sem a pretensão de resumir nesta seção a abrangência da temática em questão, destaca-se a seguir algumas aplicações práticas da ACV associada a produção de cana-de-açúcar e etanol: emissão de GEE em cana fertirrigada (Lopes, 2017); emissão de GEE no ciclo de vida do etanol (Garcia & Sperling, 2010); inventário do ciclo de vida associado ao manejo da cana de açúcar (Souza, 2013); e o mais citado em estudos de ACV da cana de açúcar “balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil” (Macedo et al., 2004).

Diante do exposto, a presente pesquisa avaliou o ciclo de vida da produção de cana de açúcar na unidade BP Bunge, em Pedro Afonso-TO, e analisou os efeitos do uso da remineralização de solos no balanço de emissões e na remoção de carbono.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo toma como ponto de partida duas pesquisas anteriores que tratam do potencial de captura de CO₂eq pela prática da remineralização de solos, e dos efeitos da remineralização sobre a produção da cana de açúcar, cujos resultados são incorporados a avaliação do ciclo de vida (ACV) que segue as diretrizes contidas nas normas ABNT NBR ISSO 14040 e 14044, e nos procedimentos descritos por Macedo et al. (2004), conforme destacados a seguir:

Definição de objetivo e escopo

Com base nos objetivos da avaliação são definidos o sistema de produto, a função do sistema, as fronteiras do sistema, o fluxo de referência e a unidade funcional. A ACV proposta é atribucional e parcial uma vez que neste momento envolve apenas a produção agrícola da cana de açúcar (*cradle-to-gate*). Os limites do sistema compreendem a área plantada de cana de açúcar da unidade da BP Bunge, em Pedro Afonso-TO (safra 2023/24). O objetivo foi quantificar as emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) associadas à produção de matéria prima para a indústria de álcool, e estimar o potencial do uso da remineralização de solos no balanço de emissões e na remoção de carbono expressas em kg CO₂eq. A unidade funcional adotada é 1 tonelada de cana-de-açúcar. Os dados coletados são referentes ao horizonte temporal de um ciclo de vida da cana-de-açúcar, ou seja, um ano, e abrangem todas atividades de manejo da rebrota do canavial (cana-soca).

Fronteiras do sistema de produção de cana-de-açúcar e etanol

O processo de produção de etanol começa na etapa de agricultura e termina no consumo final do produto. No presente estudo foi considerada somente a etapa de agricultura, mais especificamente da cana-soca iniciada após a colheita/corte da cana-planta. Na Figura 1 são delimitadas as fronteiras do sistema do produto, e identificadas as etapas do processo, as atividades, os inputs e outputs do sistema de interesse. O cenário considerado para levantamento das emissões representa as atividades agrícolas empregadas, e valores médios de consumo e produção obtidos no inventário do ciclo de vida. Os cálculos das emissões de GEE são realizados a partir das equações 1 e 2, propostas por Garcia e Sperling (2010), e consideram as emissões decorrentes dos insumos consumidos na produção agrícola, bem como as emissões associadas aos processos de obtenção e transporte desses insumos

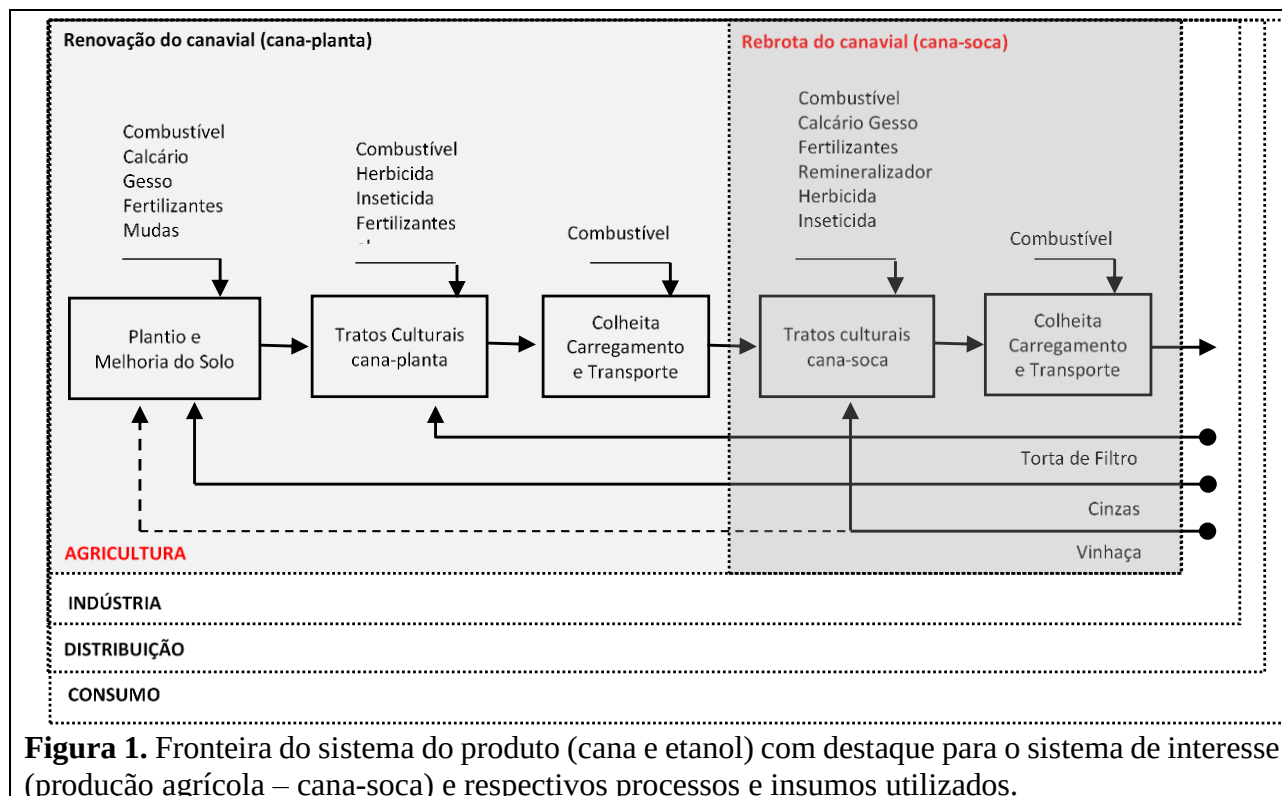


Figura 1. Fronteira do sistema do produto (cana e etanol) com destaque para o sistema de interesse (produção agrícola – cana-soca) e respectivos processos e insumos utilizados.

Inventário de ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida foi realizado a partir da consulta aos dados disponibilizados pela empresa - dados primários de consumo de insumos e combustíveis fornecidos pela unidade industrial, de produtividade referentes ao 4º ciclo de corte (cana-soca) da safra 2023/24 obtidos em experimento a campo (Tabela 1), e dos fatores de referência do IPCC (2019), que contemplam todas as etapas desde o preparo do solo até a colheita da cana de açúcar, e os fluxos de entradas (materiais e energia) e saídas (emissões e resíduos) resultantes dos manejos agrícolas avaliados (convencional e alternativo).

O sistema de produção é mecanizado, desde o plantio à colheita, o carregamento e o transporte, tratando-se, portanto, de cana crua. O preparo de solo para o plantio é convencional. Apesar de terem sido levantadas informações de renovação do canavial e da rebrota, neste momento é considerada apenas a rebrota pelo

fato da remineralização ter sido utilizada apenas na cana-soca.

O manejo agrícola “convencional” adotado na unidade tem evoluído tecnicamente com a inclusão de novas técnicas que incluem o retorno da torta de filtro, das cinzas de caldeira e da vinhaça para as áreas cultivadas, em especial na renovação do canavial. A vinhaça é utilizada nas áreas irrigadas com pivô devido as facilidades operacionais, e por isso também se aplica nas áreas de cana-planta (renovação) e cana-soca (rebrota). Mais recentemente outras técnicas passaram a compor os itinerários do manejo agrícola “alternativo”, como o uso de microrganismo eficiente (*Azospirillum*), remineralizadores de solo e/ou composto orgânico enriquecidos com minerais. A Tabela 1 resume as características do sistema de produção agrícola e os índices de desempenho produtivo dos manejos considerados – convencional e alternativo.

Tabela 1. Etapas, insumos utilizados por hectare, e desempenho produtivo dos manejos considerados no presente estudo (4ª ciclo de corte, safra 2023/24).

Etapas/Atividades	Insumos	Unid	Convencional	Alternativo
Rebrota da soqueira				
Tratos culturais cana-soca	Combustível	L	14,7	26,7
	Calcário	T	1	1
	Gesso	T	1	1
	Fertilizantes*	kg	420	--
	Remineralizador	T	--	3
	Inseticida	L	0,25	0,25
Colheita, carregamento e transporte	Combustível	L	37,5	42,7
Índice de Produtividade		TCH	72,8	80,8
		ATR	148	136

* Fertilizante NPK 18-06-23; TCH – Tonelada de Colmo por Hectare; ATR – Açúcar Total Recuperável.

- Consumo de combustível:

a) o transporte de calcário, gesso, fertilizante e remineralizador totaliza 2.420 kg de carga no manejo convencional e 5.000 kg no manejo alternativo, de maneira que a utilização de um caminhão com capacidade de 27 toneladas e consumo de 3,2 Km L⁻¹, percorrendo uma distância média de 200 Km, consome entre 5,6 e 11,6 L ha⁻¹ nos respectivos manejos;

b) as operações para os tratos culturais da cana-soca consomem em média 9,11 L ha⁻¹ (Macedo et al., 2004), mas no caso do manejo alternativo é adicionada mais uma operação de aplicação do remineralizador resultando em consumo adicional de 6 L ha⁻¹;

c) a colheita mecânica utiliza colhedoras com transbordo de 35 Mg h⁻¹ e consumo de 18,7 L h⁻¹, de maneira que a colheita de 72-80 Mg ha⁻¹ resulta no consumo de 37,5 e 42,7 L ha⁻¹ nos manejos convencional e alternativo, respectivamente.

- Consumo de insumos:

a) o calcário e o gesso são insumos comuns de ambos os manejos (convencional e alternativo), com aplicação 1 Mg ha⁻¹ a lanço em área total;

b) o fertilizante NPK (18-06-23) utilizado no manejo convencional é aplicado na dose de 420 kg ha⁻¹ a lanço em cobertura após a colheita, totalizando 75,6 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 25,2 kg ha⁻¹ de fósforo e 96,6 kg ha⁻¹ de potássio;

c) o remineralizador de solo é aplicado no manejo alternativo após colheita na dose de 3 Mg ha⁻¹ a lanço em área total;

d) os inseticidas/herbicidas são aplicados em doses de 0,25 kg ha⁻¹ entre o término da brotação e o início do perfilhamento das plantas.

Com base nas características do sistema de produção e nas etapas/atividades correspondentes aos manejos avaliados, a estimativa das emissões de GEE foi calculada conforme proposto por Garcia e Sperling (2010), ou seja, aplicando-se equação (eq. 1), na qual as emissões de cada etapa produtiva resultam do produto entre a quantidade de insumo consumido e seu respectivo fator de emissão:

$$E_{ij} = Im_j \cdot EF_m \quad (\text{eq. 1})$$

onde: **E_{ij}**: emissões de GEE (kg CO₂eq/ha) correspondente à atividade agrícola **j** presente na etapa produtiva **i** (plantio e melhoria do solo, tratos culturais cana-soca e colheita, carregamento e transporte); **j** (operações preparo do solo, aplicação de calcário, gesso, fertilizantes e remineralizador, aplicação de defensivos agrícolas, colheita mecânica da cana, transbordo/carregamento e transporte até a indústria); **Im_j** (quantidade consumida dos insumos **m** nas atividades **j** presentes em cada etapa produtiva); **m_j** (combustível, calcário, gesso, fertilizantes, remineralizador, defensivos agrícolas e cana colhida); **EF_m** (fator de emissão GEE do insumo **Im_j**).

A partir das estimativas iniciais das respectivas etapas/atividades, as emissões totais foram calculadas utilizando-se a seguinte equação (eq. 2).

$$ET = \sum Ei \quad (\text{eq. 2})$$

na qual: **ET**: emissões totais de GEE; **Ei**: emissões de GEE correspondentes a uma etapa **j** ou atividade **i** considerada nos cálculos das emissões parciais.

Avaliação de impacto

Tendo como base os resultados do inventário do ciclo de vida (ICV), os impactos ambientais potenciais de ambos os sistemas de manejo da cana de açúcar (convencional e alternativo) foram calculados pelo método ReCiPe 2016 (Huijbregts et. al, 2017). De acordo com os autores o método converte emissões de substâncias e as extrações de recursos inventariadas em indicadores que expressam a magnitude do impacto ambiental potencial dentro de cada uma das 18 categorias de impacto de nível intermediário (midpoint). Em cada categoria, o indicador corresponde ao somatório dos produtos entre a quantidade de cada substância emitida ou extraída e o respectivo fator de caracterização. O ReCiPe 2016 trata as incertezas e as escolhas de valor da modelagem ambiental por meio de três perspectivas culturais: individualista, hierárquica e igualitária. Elas diferem, entre outros aspectos, quanto ao horizonte temporal adotado. Neste estudo foi adotada a perspectiva hierárquica (H), que é a perspectiva de consenso científico e padrão do método.

Em consonância com os objetivos propostos a avaliação se restringiu apenas a categoria de impacto “mudanças climáticas”. Nessa categoria, as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) foram convertidas em CO₂ equivalente por meio dos fatores de caracterização de potencial de aquecimento global em horizonte de 100 anos (GWP100). Esses fatores derivam do Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), ou seja: 1 para o CO₂, 34 para o CH₄ de origem biogênica, 36 para o CH₄ de origem fóssil e 298 para o N₂O. Com isso, as diferentes emissões puderam ser somadas em uma única unidade comparável entre os dois

sistemas de manejo, o quilograma de CO₂ equivalente (kg CO₂eq) por unidade funcional.

A partir do inventário e da avaliação de impacto em relação aos objetivos e escopo do estudo, a interpretação foca o desempenho do uso da remineralização como uma tecnologia de remoção de carbono. A contabilização do carbono envolve as emissões dos gases de efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O), expressa em carbono equivalente (CO₂eq). No computo do balanço de carbono é considerado o potencial de remoção de CO₂eq resultante do uso de um remineralizador de solos, calculado conforme proposto por Renforth (2012), cujo potencial é de 0,234 t CO₂eq t⁻¹.

Os resultados dos efeitos potenciais das estratégias de uso do remineralizador sobre o balanço e as remoções líquidas de carbono são expressos por unidade de área (t CO₂eq ha⁻¹) e por tonelada de cana de açúcar (t CO₂eq t⁻¹).

A sistematização dos dados de entradas e saídas levantados no inventário foi parametrizada com o auxílio dos bancos de dados ecoinvent 2.2 e 3.4, os quais fornecem os fatores de emissão mais atualizados para a obtenção e o transporte dos insumos (fertilizantes, calcário, gesso, remineralizador e combustíveis), e o software de acesso livre OpenLCA 2.1.0. (openlca.org/).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emissões de GEE associadas aos respectivos manejos são apresentados na Tabela 2, amparados pelos dados de consumo dos insumos e fatores de conversão para kg CO₂eq. Os resultados obtidos mostram que as emissões de GEE do manejo convencional foram 15% maior que no manejo alternativo, ou seja, uma diferença a mais de 234,8 kg CO₂eq. A maior parte das emissões estão associadas ao consumo de combustíveis, responsáveis por 55% e 65% das emissões de CO₂eq dos manejos convencional e alternativos, respectivamente. Os fertilizantes por sua vez compõem 18% das emissões de CO₂eq do manejo convencional e apenas 0,5% das emissões do manejo alternativo, enquanto os corretivos somam 27% e 31% das emissões desses mesmos manejos. Os defensivos representam menos de 0,01% das emissões de CO₂eq.

Tabela 2. Resumo do inventário do ciclo de vida e das emissões associadas a cada etapa/atividade e insumos utilizados nos manejos avaliados.

Insumos	Consumo		Fator*	Emissões (kg CO ₂ eq ha ⁻¹)	
	Convencional	Alternativo		Convencional	Alternativo
Combustíveis (L ha ⁻¹)	352,2	369,4	3,01 ⁽¹⁾	1.060,1	1.111,9
Calcário (kg ha ⁻¹)	1000	1000	0,50 ⁽²⁾	500	500
Gesso (kg ha ⁻¹)	1000	1000	0,02 ⁽²⁾	20	20
Fertilizantes (kg ha ⁻¹)	420	--			--
	75,6 kg ha ⁻¹ N		3,03	229,1	
	25,2 kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅		2,67	67,3	
	96,6 kg ha ⁻¹ K ₂ O		0,52	50,2	
Remineralizador (kg ha ⁻¹)	--	3000	0,02 ⁽²⁾	--	60
Defensivos (L ha ⁻¹)	0,25	0,25	7,57 ⁽³⁾	1,9	1,9
Total				1.928,6	1.693,8

* Fator de Emissão IPCC e Ecoinvent (KgCO₂eq/kg ou kgCO₂eq/L);

⁽¹⁾ Emissões diretas 2,65 kg CO₂eq/L; Emissões indiretas 0,37 kgCO₂eq/L;

⁽²⁾ Emissões de obtenção 0,02 KgCO₂eq/kg; Emissões da reação no solo 0,48 kgCO₂eq/kg;

⁽³⁾ Média dos fatores de emissão.

Ao considerar a produtividade de ambos os manejos em termos de tonelada de cana por hectare (TCH) e metros cúbicos de álcool por hectare (AH), conforme apresentado na Tabela 3, o manejo convencional emitiu 5,55 kg CO₂eq a mais que o manejo alternativo para cada tonelada de cana produzida. No caso do etanol essa diferença foi de 42,7 kg CO₂eq por m³ de álcool ou 0,36 kg CO₂eq por litro produzido.

Os resultados obtidos estão condizentes com a literatura sobre ICV da etapa agrícola da produção de cana-de-açúcar, a exemplo de Ponce (2019), que reporta emissões de 29,56 kg CO₂eq

Mg⁻¹ de cana produzida em sistema de manejo convencional, valor próximo ao observado no presente estudo.

Outra possível comparação dos resultados apresentados na Tabela 3 é feita em termos de emissões de CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, uma vez que o ciclo de corte para colheita da cana na usina de Pedro Afonso-TO varia entre 12-18 meses. Então, para uma situação em que são realizados 5 ciclos de colheita no período total de 7 anos, as emissões do manejo convencional são de 1.377,6 Kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, e do manejo alternativo 1.209,85 Kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹.

Tabela 3. Emissões associadas à produção de cana e álcool dos manejos avaliados conforme dados de produtividade da Unidade BP Pedro Afonso - TO (safra 23/24).

Manejos	Produtividade			Emissões (kg CO ₂ eq)	
	TCH	ATR	AH	TCH	AH ⁽¹⁾
Convencional	72,7	148	6,24	26,53	309,07
Alternativo	80,7	136	6,36	20,98	266,32

TCH: Tonelada de Cana por Hectare (Mg ha⁻¹); ATR: Açúcar Total Recuperável (kg t⁻¹); AH: Álcool por Hectare (m³ ha);

⁽¹⁾ 1 kg ATR = 0,58 L de Etanol Hidratado.

Potencial da redução de emissões com a prática da remineralização

Conforme se observa dos resultados descritos anteriormente, ambos os manejos apresentam níveis consideráveis de emissões de CO₂eq por unidade de área (ha), produto obtido (cana e álcool) ou período (ano). No balanço das emissões resultantes do manejo alternativo envolvendo o uso de remineralizador de solos em

substituição aos fertilizantes convencionais, o produto remineralizador apresenta um potencial líquido de remoção de 0,234 Mg CO₂eq t⁻¹ de rocha aplicada ao solo.

Portanto, considerada a aplicação de uma dose de 3 Mg ha⁻¹ o remineralizador remove 702 kg CO₂eq ha⁻¹, que somados aos 234,8 Kg CO₂eq ha⁻¹ das emissões evitadas do manejo alternativo em relação ao manejo convencional (Tabela 2),

tem-se que para as condições avaliadas a remineralização reduz as emissões em até 936,8 kg CO₂eq ha⁻¹.

De acordo com dados da Plataforma MapBiomas (Figura 2), em 2024 o município de Pedro Afonso-TO, local da Usina de BP Bioenergy, totalizou 20.479 ha de área plantada com cana-de-açúcar e 22.403 ha de área plantada

de soja. Já os dados estatísticos da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE), também de 2024, indicam que no município de Pedro Afonso-TO foram plantados 34.760 ha de cana de açúcar. Esses últimos são mais próximos dos números da empresa, 35 mil ha cultivados com cana.

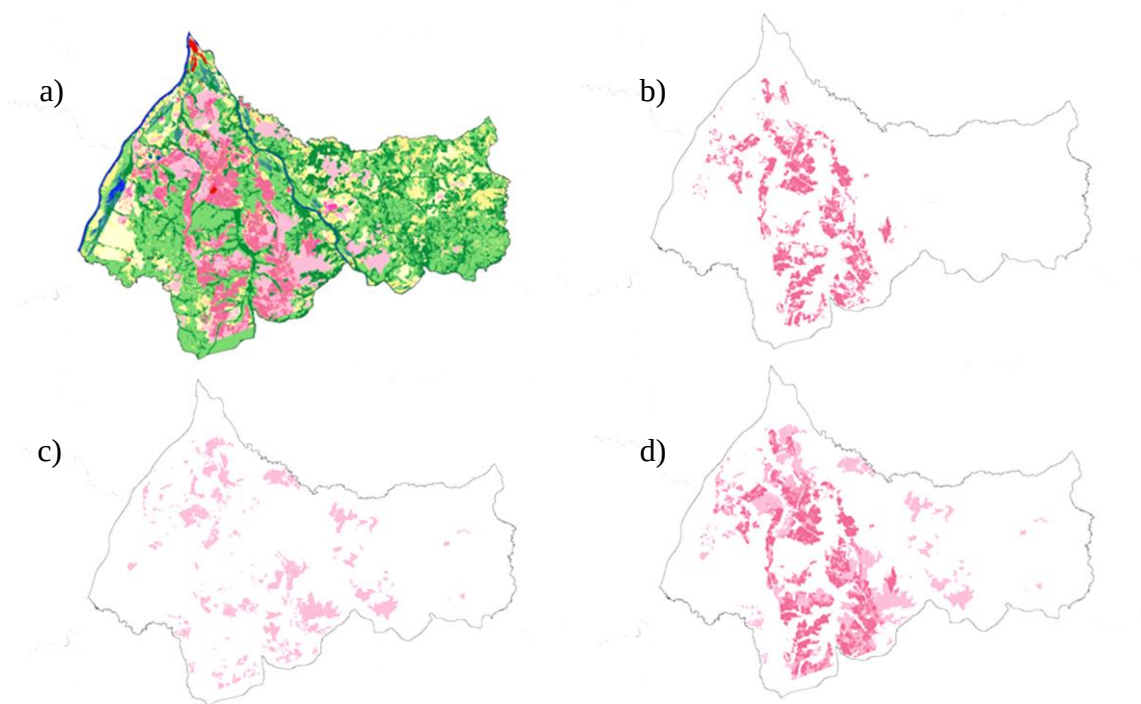


Figura 2. Recorte territorial do município de Pedro Afonso - TO com: (a) distribuição de uso e cobertura do solo; (b) áreas plantadas com cana de açúcar; (c) áreas plantadas com soja; (d) áreas plantadas como cana e soja. (Fonte: Plataforma MapBiomas)

Portanto, diante da possibilidade da remineralização ser inserida em 100% da área cultivada com cana de açúcar, as emissões evitadas somam 8,22x10⁶ Mg CO₂eq ano⁻¹, enquanto as reações de intemperismo aprimorado acrescentam ao balanço mais 24,57x10⁶ Mg CO₂eq.

No balanço geral entre emissão e remoção o manejo alternativo apresenta um potencial de redução de 46,8% das emissões de CO₂eq da produção agrícola da Usina. Se considerado que cada Mg CO₂eq pode ser convertida em um crédito de remoção de carbono (CDR, as emissões evitadas com o manejo alternativo podem gerar 32 mil CDRs ano⁻¹.

Avaliação de impacto do ciclo de vida da cana de açúcar

Com base nos dados do inventário do ciclo de vida (ICV) foram dimensionadas as emissões de CO₂eq, utilizando-se como unidade funcional 1 hectare de área cultivada com cana-de-açúcar. Na etapa agrícola do ciclo de vida da cana-de-açúcar, especialmente do manejo da rebrota, as fontes de impacto decorrem em maior parte das operações mecânicas de colheita, transbordo e aplicação de fertilizantes.

As contribuições relativas das fontes de impacto resultantes de ambos os manejos são apresentadas na Figura 3. A semelhança dos resultados obtidos por outros autores (Ponce, 2019;), observa-se que os combustíveis represen-

tam o principal aspecto ambiental da categoria mudanças climáticas, compondo a maior parte das emissões de CO₂eq dos manejos convencional (55%) e alternativo (65%).

Conforme amplamente descrito na literatura, e muito bem explorado por Bordonal et al. (2018), os fertilizantes constituem aspecto ambiental relevante do impacto das mudanças climáticas. No presente estudo o manejo nutricional envolvendo fertilizantes, calcário, gesso e remineralizador de solos, foi a segunda maior fonte de emissões de CO₂eq do manejo convencional (45%) e do manejo alternativo (34%). Lisboa et al (2011) constataram em suas pesquisas que os fertilizantes somaram cerca de 40% da emissão de GEE no cultivo da cana de açúcar.

Em termos relativos, o consumo de calcário representa principal fonte de emissões do manejo nutricional, ou seja, 55% e 80% das emissões totais dos manejos convencional e alternativo, respectivamente (Tabela 2). Os fertilizantes convencionais (NPK) são responsáveis por 18% das emissões do manejo convencional, das quais, 66% são decorrentes dos fertilizantes nitrogenados (ureia). A remineralização compõe 10% das emissões relativas ao manejo nutricional, e apenas 3,5% das emissões totais do manejo alternativo, pois diferente do calcário, não resulta em emissões adicionais decorrentes da dissolução do carbonato no solo (carbonatação) e liberação de CO₂. Por fim, o consumo de gesso agrícola ou sulfato de cálcio (gipsita) é responsável por 1% das emissões totais de ambos os manejos, enquanto o consumo de defensivos agrícolas responde por apenas 0,1% das emissões totais.

Em síntese, o impacto ambiental da categoria mudanças climáticas foi 12,2% maior no manejo convencional (+ 234,8 kg CO₂eq ha⁻¹) em comparação ao manejo alternativo que envolve a aplicação do remineralizador de solos em substituição aos fertilizantes NPK. Em termos produtivos, conforme resultados apresentados na Tabela 3, essa diferença aumenta para 20,9% na produção de cana (+ kg 5,5 kg CO₂eq t⁻¹) e 13,8% na produção de álcool (+ 42,7 Kg CO₂eq m⁻³). No balanço geral de emissões, considerada o potencial de captura de carbono da remineralização (0,234 t CO₂eq t⁻¹), o manejo

alternativo emite 46,8% menos CO₂eq que o manejo convencional (Tabela 3).

As principais fontes de impacto ambiental na produção de cana de açúcar estão relacionadas ao consumo direto e custo indireto da cadeia de produção e distribuição de combustíveis fósseis.

A magnitude da redução observada aproxima a remineralização de outras estratégias de mitigação já documentadas para a cana-de-açúcar, como o manejo diferenciado da adubação nitrogenada (Borges et al., 2019) e as práticas de manejo conservacionista discutidas por Bordonal et al. (2018). Diferentemente dessas alternativas, contudo, a remineralização combina a redução de emissões evitadas com a remoção ativa de CO₂ via intemperismo de rochas silicáticas, o que confere a essa tecnologia um duplo benefício climático (Lefebvre et al., 2019; Eufrazio et al., 2022).

Algumas iniciativas brasileiras de ERW (*enhanced rock weathering*) tem colocado o país na vanguarda dessa tecnologia de remoção de carbono. Recentemente a Terradot, startup americano-brasileira de remoção de carbono, noticiou a implementação de um projeto-piloto ERW em parceria com a Embrapa Cerrados, financiado pela Google, que visa abranger 200 mil hectares de área agrícola no Rio Grande do Sul (AgFeed, 2026). A startup Inplanet comercializou os primeiros créditos certificados de remoção de carbono do país a partir da aplicação de pó de basalto em lavouras de cana-de-açúcar, em Rio Claro-SP (Minera Brasil, 2025). Portanto, pode-se afirmar que o presente estudo, ao quantificar de forma criteriosa o potencial de remoção de CO₂ pelo ERW em condições reais de manejo agrícola, contribui para sustentar a expansão dessas iniciativas na cultura da cana-de-açúcar.

Do ponto de vista de política pública, o potencial de remoção de carbono do ERW é diretamente conversível em créditos de descarbonização (CDR), o que pode viabilizar economicamente sua adoção em larga escala no setor sucroenergético, complementando programas já existentes de incentivo a descarbonização, como o RenovaBio, instituído pela Política Nacional de Biocombustíveis (ANP, 2026). Nesse sentido, a possibilidade de

reconhecer créditos associados ao ERW representaria uma ampliação relevante do escopo do programa, permitindo capturar simultaneamente o benefício de mitigação evidenciado neste estudo (redução das emissões líquidas por tonelada de cana e por hectare) e o benefício de remoção ativa propiciado pela prática da remineralização de solos.

No âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e do Plano Clima 2024-2035 (Brasil, 2024), a remoção de carbono baseada na remineralização de solos alinha-se diretamente aos objetivos de mitigação de médio e longo prazo estabelecidos pela nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), ao mesmo tempo em que oferece co-benefícios agronômicos capazes de viabilizar sua adoção em larga escala pelo setor sucroenergético, um dos pilares da matriz energética renovável do país.

Incertezas associadas às premissas

As incertezas associadas aos resultados obtidos estão relacionadas a alguns aspectos do próprio manejo agrícola, em especial da produtividade de TCH (toneladas de cana por hectare), a qual é influenciada não apenas pelos insumos aplicados, mas, também, por fatores climáticos. Por sua vez, a TCH influencia a vida útil e o número de ciclos de corte da cana-de-açúcar, reduzindo os impactos da renovação do canavial. Deve-se verificar se o manejo alternativo promoverá maior número de ciclos de corte.

A introdução de inovações recentes ao manejo agrícola da unidade industrial, como o uso de microrganismos eficientes, fertilizantes organominerais entre outras constituem fontes de incertezas capazes de influenciar os resultados. Ou seja, diante dos efeitos esperados dessas inovações poderá haver redução das emissões e/ou aumento da remoção e captura de CO₂ no solo.

A unidade funcional constitui outra fonte de incertezas, pois conforme observado, a diferença nas emissões dos manejos avaliados aumenta da unidade “área” (t CO₂eq ha⁻¹) << “TCH” (t CO₂eq t⁻¹ de cana) <<< “AH” (t CO₂eq m⁻³ de álcool).

Importante mencionar que o presente estudo não levou em conta a aplicação de vinhaça ou torta de filtro devido não estarem presentes no manejo da rebrota (cana soca), e também não considerou o acúmulo e de resíduos da cana (palhada).

CONCLUSÃO

O uso da remineralização apresenta efeito positivo no balanço de carbono do ciclo de vida da etapa agrícola de produção de cana-de-açúcar.

O impacto ambiental da produção de cana de açúcar sobre as emissões de carbono está relacionado principalmente ao consumo de combustíveis fósseis.

O manejo alternativo com uso da remineralização emitiu 46,8% menos CO₂eq que o manejo convencional com uso de fertilizantes convencionais solúveis.

O menor impacto do manejo alternativo resulta da redução das emissões decorrente da substituição dos fertilizantes convencionais pelo remineralizador de solos.

As emissões (kg CO₂eq) aumentam conforme a unidade funcional, sendo maior para produção de cana (Mg⁻¹) ou álcool (m⁻³), do que para área (ha⁻¹).

As incertezas dos resultados estão relacionadas principalmente à produtividade e fatores climáticos, os quais exercem influência sobre a longevidade do canavial.

A adoção da remineralização em toda a área cultivada com cana-de-açúcar da unidade industrial pode gerar mais de 30 mil CDRs ano⁻¹.

A remineralização apresenta vários co-benefícios para além da captura ou menor emissão de CO₂eq, com destaque para o menor custo econômico, a melhoria constante do solo e os ganhos quantitativos e qualitativos da produção.

FINANCIAMENTO

A presente pesquisa contou com o apoio financeiro do CNPq através de projeto aprovado no Edital CNPq/CT-Mineral N° 27/2022, e da UNITINS, mediante a concessão de bolsa de produtividade em pesquisa aprovada no Edital UNITINS/Propesp/DPI N° 07/2023.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT ISO 14040: Gestão ambiental - **Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**, 2009.
- ABNT ISO 14044: Gestão ambiental - **Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**, 2009.
- AgFeed (2026). **Google coloca arroz gaúcho com pó de rocha na receita de seu maior contrato para remoção de carbono**. Disponível em: <https://agfeed.com.br/esg/>.
- ANP (2026). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Relatório Anual RenovaBio 2025**. Brasília: MME. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/relatorios-anuais-do-renovabio/relatorio-anual-renovabio-2025>
- Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P., Scholes, J.D., Ton, J., Nelson, P.N., Bird, M.I., Kantzas, E., Taylor, L.L., Sarkar, B., Kelland, M., Delucia, E., Kantola, I., Müller, C., Rau, G.H., Hansen, J. (2018). Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. **Nat. Plants** 4. p. 138 a 147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>.
- Bordonal, R. de O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., de Figueiredo, E. B., de Oliveira, B. G., & La Scala, N., Jr. (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, 38(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>
- Borges, C. D., Carvalho, J. L. N., Kolln, O. T., Sanches, G. M., Silva, M. J., Castro, S. G. Q., et al. (2019). Can alternative N-fertilization methods influence GHG emissions and biomass production in sugarcane fields? **Biomass & Bioenergy**, 120, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.017>
- Brasil. (2016). Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Portaria MMA nº 150/2016. Brasília: MMA.
- Brasil. (2024). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). **Plano Clima Brasil 2024-2035: Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil**. Brasília: MMA. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/plano-clima>
- EPE. (2021). **Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Empresa de Pesquisa Energética. – EPE: Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos>
- Eufrazio, R.M., Kantzas, E.P., Edwards, N.R. (2022). Environmental and health impacts of atmospheric CO2 removal by enhanced rock weathering depend on nations' energy mix. **Commun Earth Environ.** 3, 106. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00436-3>.
- Funes, R. H. (2016). **Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono da reciclagem de CO2 em um sistema de produção de etanol de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – PPGSACH/USP. 125 p.
- Fuss, S., Lamb, W.F., Max, W., Nemet, G.F., Callaghan, M.W., Von Stechow, C., Minx, J.C., Beringer, T., Garcia, W.D.O., Hartmann, J., Khanna, T. (2018). Negative emissions d Part 2: costs, potentials and side effects. **Environ. Res. Lett.** 13. p. 63 a 72. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; New York. 1535 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; Van Zelm, R.. (2017).

- ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.138-147. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- Lefebvre, D.; Goglio, P.; Williams, A.; Manning, D.A.C.; Azevedo, A.C.; Bergmann, M.; Meersmans, J.; Smith, P. (2019). Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, V. 233, p. 468-481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>.
- Taylor, L.L., Beerling, D.J., Quegan, S., Banwart, S.A. (2017). Simulating carbon capture by enhanced weathering with croplands: an overview of key processes highlighting areas of future model development. **Biol. Lett.** 13. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0868>.
- Macedo, I.C.; Leal, M.R.L.V.; Silva, J.E.A.R.; Goldemberg, J.; Christo, T.; Lobato, C.P. (2004). **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/5be955aa-f045-489f-8533-3993830ea0b7/full>
- Minera Brasil. (2025). **Brasil nologia para remoção de carbono**. Dse destaca com certificação inédita de tecisponível em: <https://minerabrasil.com.br/>.
- Souza, W.L.B.. (2013). **Inventário dos gases de efeito estufa associado ao manejo da cana-de-açúcar na localidade de Barretos-SP, Brasil**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 49 p. <http://hdl.handle.net/11449/96826>
- Garcia, J.C.C. & Sperling, E. (2010). Greenhouse gas emissions in the life cycle of ethanol: estimation in agriculture and industrialization stages in Minas Gerais, Brazil. **Eng Sanit Ambient**. v.15 n.3. | 217-222.
- Lisboa, C.; Butterbach-Bahl, K.; Mauder, M.; Kiese, R. (2011). Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases—known and unknowns. **Gcb Bioenergy**, v. 3, n. 4, p. 277-292..
- Ponce, R.O. (2019). **Avaliação do ciclo de vida dos sistemas de produção orgânico e convencional da cana-de-açúcar: um estudo comparativo**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária. Jaboticabal-SP. 83 p.