

Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil

Autores

Ane Alencar¹
Bárbara Zimbres¹
Camila Silva¹
David Tsai²
Felipe Barcellos e Silva²
Gabriel de Oliveira Quintana⁴
Ingrid Graces²
Iris Coluna³
Julia Zanin Shimbo¹
Kaccnny Carvalho³
Renata Fragoso Potenza⁴
Tasso Azevedo⁵

Revisores

Claudio Angelo⁵
Tasso Azevedo⁵

Projeto Gráfico e Diagramação

Bia Gomes⁶
Cecília Gomes

Ilustrações

Mario Kanno

¹ Ipam - Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

² IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente

³ ICLEI - Governos Locais para Sustentabilidade

⁴ Imaflores - Instituto de manejo e Certificação Florestal e Agrícola

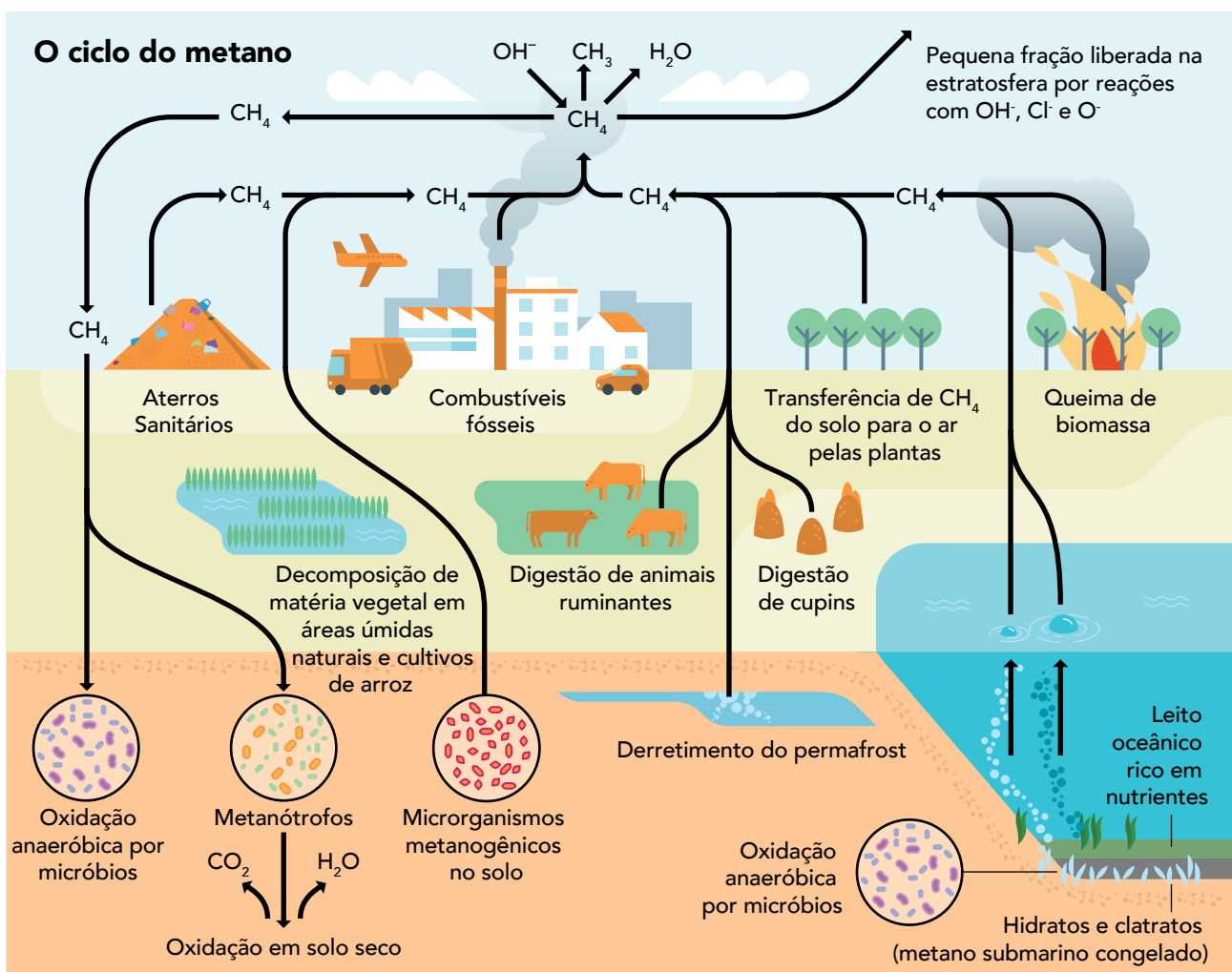
⁵ OC - Observatório do Clima

⁶ Revuo Design

Sumário executivo

- O metano (CH_4) é um poderoso gás de efeito estufa e o segundo maior responsável pelo aquecimento global. **Cada tonelada de metano tem 28 vezes mais potencial de esquentar o planeta em cem anos do que uma tonelada de dióxido de carbono (CO_2)**, o maior causador da crise climática.
- **A concentração atmosférica do metano mais que dobrou desde os tempos pré-industriais.** Felizmente ela é muito menor que a do CO_2 - mede-se em partes por bilhão de ar em vez de partes por milhão, caso do gás carbônico. O metano também dura menos na atmosfera, aproximadamente 12 anos, contra 150 do CO_2 . Daí ele ser classificado como um poluente climático de vida curta (SLCP).
- O metano também contribui para a formação de ozônio troposférico (O_3), que, como ele, é um gás de efeito estufa de curta duração, mas poderoso. O chamado ozônio de superfície também é um poluente do ar com efeitos prejudiciais para a saúde humana, os ecossistemas e a agricultura.

Figura I. O ciclo do metano



- As emissões globais de metano chegaram a 364 milhões de toneladas em 2020, o que representa 10 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, ou 16% das emissões globais de gases de efeito estufa em CO₂e. **Metade do aumento líquido da temperatura global verificado hoje se deve ao CH₄.**
- Esse alto potencial de aquecimento e a menor duração na atmosfera fazem do metano um bom alvo para políticas de redução imediata de emissões de gases de efeito estufa que ajudem a humanidade a ganhar tempo para fazer a transição energética para uma economia sem combustíveis fósseis e, assim, manter viva a meta do Acordo de Paris de limitar o aquecimento da Terra a 1,5°C em relação à era pré-industrial.
- Na COP26, em Glasgow, Escócia, mais de cem países assinaram o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*), e se comprometeram a **reduzir as emissões de metano em 30% até 2030 em relação aos níveis de 2020**. Isso põe pressão nos países e nos cientistas para compreender os padrões, as causas e os fatores de mitigação mais importantes, para que essa meta seja cumprida.
- **O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo.** Sozinho ele emite o equivalente a 5,5% do metano do planeta, enquanto a participação do país nas emissões gerais de gases de efeito estufa é de 3,3%. As emissões brasileiras em 2020 foram estimadas pelo Observatório do Clima em 21,7 milhões de toneladas em 2020, o que corresponde a 565 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e) ou 26% das emissões totais de gases de efeito estufa do país.
- As organizações integrantes do SEEG, o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima, fizeram **a primeira estimativa da trajetória das emissões nacionais de metano e propuseram uma meta para o Brasil**. Segundo os cálculos do OC, se nenhuma política for adotada, o país chegará a 2030 emitindo 23,2 milhões de toneladas, um aumento de 7% em relação a 2020.
- Por outro lado, aplicando-se as melhores práticas e tecnologias existentes e possíveis de implementar até 2030, obtém-se a emissão de 13,75 MtCH₄ em 2030, o que representa uma redução de 36,4% em relação às emissões de 2020. Isso equivale a uma redução de 180 MtCO₂e comparando 2020 e 2030.
- Assim, propomos que o Brasil adote uma **meta de redução de 36% das suas emissões de metano até 2030 quando comparado com 2020**, sendo essa uma contribuição significativa do país para meta do Compromisso Global do Metano de redução de 30% das emissões de metano até 2030.

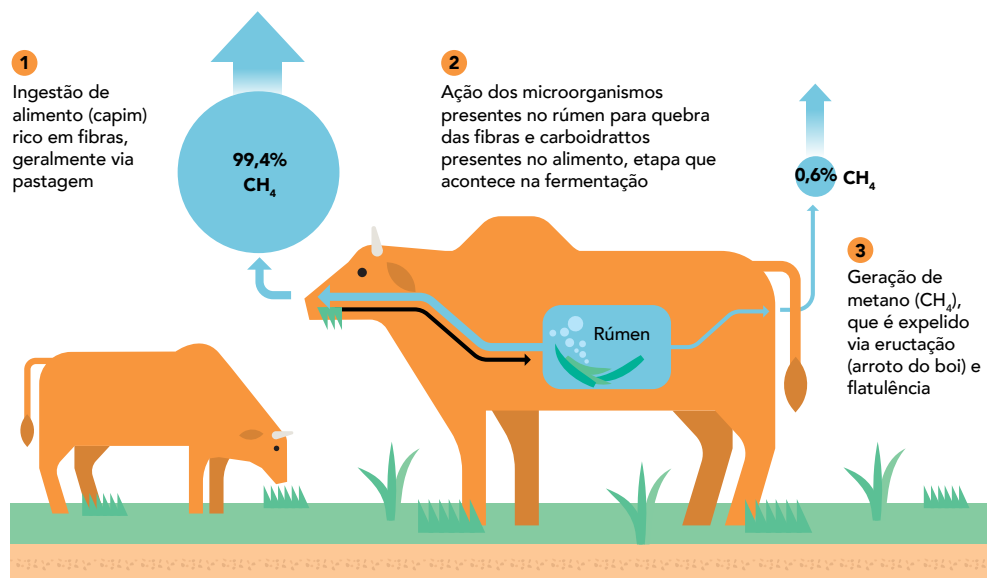
Emissões de metano no Brasil:

Agropecuária

- **O setor de agropecuária é o maior emissor de metano do Brasil**, responsável por 14,54 milhões de toneladas em 2020, ou 71,8% das emissões.
- A atividade pecuária responde por 91,6% das emissões do setor (13,32 Mt CH₄), resultantes sobretudo da fermentação entérica do rebanho bovino (o "arroto" do boi), seguida pelo manejo de dejetos animais (0,85 Mt CH₄) com 5,8%. A atividade agrícola tem 2,6%, resultantes do cultivo de arroz irrigado (0,37 Mt CH₄) da queima de resíduos da cana-de-açúcar (0,008 Mt CH₄).



Figura II.
Emissão de metano
por fermentação
entérica



- As emissões pelo cultivo de arroz irrigado aumentaram mediante o aumento da área cultivada sob sistema produtivo irrigado e o tipo de manejo do alagamento dessas áreas. Ao mesmo tempo, a produtividade aumentou mais de 70% entre 1990 e 2020.
- Para promover a redução de metano por fermentação entérica com contínuo aumento de produtividade e atendendo a demanda por produtos pecuários, foram propostas estratégias de mitigação para o rebanho bovino de corte e de leite através da adoção de terminação intensiva (TI), melhoramento genético animal (MGA), manipulação da fermentação ruminal e melhoramento da dieta animal.
- Para as emissões por manejo de dejetos animais, a estratégia de mitigação foi pautada na substituição de sistemas de tratamento de dejetos menos eficientes por tecnologias mais eficientes, com menor geração de metano pelo tratamento do sistema e acondicionamento do dejetos, como pelo uso de biodigestores e compostagem pelo rebanho de bovinos e suínos.
- A estratégia proposta para a emissão de cultivo de arroz irrigado é baseada no melhor manejo do preparo do solo pré-plantio e pelo manejo da irrigação, sem que as áreas cultivadas permaneçam constantemente alagadas.
- Para a queima dos resíduos da cana-de-açúcar, a estratégia se baseou na adoção da prática da colheita de forma mecanizada, que já reduziu em 80% as emissões dessa atividade nas últimas décadas.
- Com as práticas de manejo atuais e tendência das emissões dos últimos anos, espera-se que em 2030 as emissões do setor aumentem 5,6%, chegando a 15,37 Mt CH₄. **Com a adoção dessas estratégias de mitigação para a atividade pecuária e agrícola, pode-se obter até 30% de redução de emissões**, chegando a uma emissão possível de ser alcançada de 10,17 Mt CH₄.



Resíduos

- **O setor de resíduos é o segundo maior emissor de CH₄ no Brasil**, responsável por com 15,8% das emissões em 2020 (3,17MtCH₄).
- A maior contribuição (66.6% do total emitido) vem da disposição final de resíduos sólidos. O tratamento de efluentes líquidos domésticos fica em segundo lugar com 26%. Tratamento de efluentes líquidos industriais (6,2%), incineração e/ou queima a céu aberto (1,2%) e o tratamento biológico de resíduos sólidos (0,04%) representam juntos cerca 7,5% restantes das emissões de metano do setor.
- As principais estratégias de mitigação para o setor de resíduos podem ser alcançadas com um número significativo de estratégias de baixo e médio custo, visto que a maioria das tecnologias já está disponível para uso em escala econômica.
- As soluções com maior potencial de redução estão voltadas para resíduos sólidos através da redução gradativa de resíduos orgânicos em aterros sanitários, recuperação ou queima de pelo menos 50% do biogás gerado por aterros e a erradicação de lixões. Para o tratamento de efluentes líquidos, a ampliação da taxa de aproveitamento de biogás de estações de tratamento de esgotos também apresenta um grande potencial de corte de emissões.
- O SEEG estimou que, **caso nenhuma estratégia de mitigação seja adotada, as emissões de CH₄ no setor de resíduos devem subir 25,8% até 2030**. Se adotadas medidas condizentes com o arcabouço legislativo nacional para resíduos, pode-se alcançar uma redução de 6,5%, **podendo-se alcançar o potencial de redução de cerca 36% com mais ambição nas estratégias de mitigação propostas**.

Mudanças de uso da terra e florestas

- As mudanças de uso da terra, em especial as queimadas, representam 9% do total nacional das emissões e metano, ou 2,71 milhões de toneladas. Outras 620 mil toneladas vêm de queimadas não associadas ao desmatamento, que não são computadas no inventário nacional.
- **A Amazônia lidera a emissão de CH₄ nesse setor**, por ser onde ocorre a maior parte do desmatamento e por conter os maiores estoques de carbono.
- O SEEG também estimou as emissões de metano em reservatórios de usinas hidrelétricas. O exercício resultou em uma estimativa de CH₄ de 1,55 Mt/ano, o que provavelmente é uma subestimativa, por não considerar todos os processos que ocorrem dentro dos reservatórios e que podem gerar emissões.
- O combate ao desmatamento tem papel central na redução das queimadas associadas à abertura de novas áreas e, nesse contexto, propusemos uma meta de zerar o desmatamento com indícios de ilegalidade até 2028 como forma de reduzir as emissões de metano.
- Considerando que parte das queimadas em áreas de lavoura e pastagem é prática cultural, propusemos como meta apenas a eliminação da queima em áreas naturais.



Energia

- **O setor de energia emitiu, em 2020, 572 mil toneladas de metano, correspondendo a 2,6% das emissões do país.** Os processos industriais e uso de produtos representam outros 0,2% elevando as emissões dos dois setores a quase 3% do total nacional.
- Duas fontes emissoras majoritárias se destacam: a queima de lenha e a exploração e produção de petróleo e gás natural.
- A lenha é usada principalmente em residências para cozinhar alimentos, sendo retrato da falta de acesso a outras fontes energéticas. Nas décadas de 1970 e 1980, houve uma grande redução no consumo de lenha (e das emissões) com a disseminação do fogão a gás. A partir dos anos 1990, vemos a estagnação do consumo de lenha e das emissões de metano num patamar próximo à metade do que foi observado no início dos anos 1970.
- A substituição do uso de lenha pelos modernos fogões a gás ou elétricos reduz as emissões de metano e aumenta a qualidade de vida dos usuários. O uso de modernos fogões a lenha com queima controlada também é uma alternativa, que não gera poluição do ar no interior das casas. Há ainda a alternativa do uso de fogões elétricos que, combinada com uma matriz elétrica de baixo carbono, pode reduzir ainda mais as emissões.
- As emissões fugitivas decorrem de descargas, intencionais e não intencionais, de gases provenientes dos processos produtivos de carvão mineral, petróleo e gás natural. Dentre elas, atualmente o destaque são as emissões da exploração de petróleo e gás natural. Essas emissões foram impulsionadas pela descoberta do pré-sal na década de 2000.
- Recentemente a indústria de petróleo e gás, a nível global, tem anunciado esforços para controlar tais emissões, sendo um exemplo a *Aiming for Zero Methane Emissions Initiative*, lançada em março de 2022. A iniciativa prevê a eliminação de praticamente todas as emissões de metano dos ativos de petróleo e gás operados pelos signatários até 2030.
- O exercício de cenarização do estudo aponta que **o Brasil pode reduzir em 32% suas emissões de metano entre 2020 e 2030. E até 2050, poderia ser alcançada uma redução de 63%.**

Proposta para a redução da emissões de metano até 2030

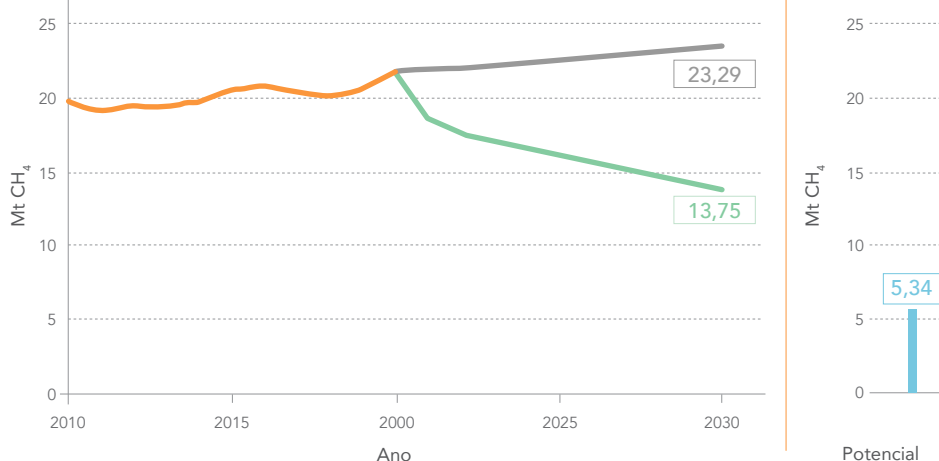
Avaliamos três cenários para emissões de metano

- (i) A direção das emissões de metano no Brasil até 2030 considerando as políticas atuais de mitigação no país (BAU);
- (ii) O potencial de redução de emissões de metano no Brasil a longo prazo;
- (iii) Uma proposta de meta de redução de emissões alcançável pelo Brasil até 2030 de forma compatível com a meta do Compromisso Global do Metano de redução de 30% das emissões em relação a 2020.



Figura III.
Emissões
nos cenários
BAU, Meta e
Potencial

SEEG
BAU
Meta



Ao agregar os valores das análises de cada um dos quatro setores (agropecuária; mudanças de uso da terra e florestas; tratamento de resíduos; e energia*), obtemos para o **cenário BAU** uma emissão 23,3 MtCH₄ em 2030 com um crescimento de 7% das emissões em relação aos 21,7 MtCH₄ de 2020 (Figura 33).

Já para o **Cenário Potencial de Redução** temos uma emissão de 5,3 MtCH₄ que representa uma redução de 75% das emissões em relação a 2020. Ou seja, com as tecnologias conhecidas não é possível zerar as emissões de metano. Seria necessário fazer uso de compensações com remoção de carbono equivalente para zerar emissões residuais.

Por fim, aplicando-se as melhores práticas e tecnologias existentes e possíveis de serem implementadas até 2030, obtém-se a emissão de 13,75 MtCH₄ em 2030, o que representa uma redução de 36,4% em relação às emissões de 2020. Isso equivale a uma redução de 180 MtCO₂e comparando 2020 e 2030.

Assim, propomos que o Brasil adote uma **meta de redução de 36% das suas emissões de metano até 2030 quando comparado com 2020**, sendo essa uma contribuição significativa do país para meta do Compromisso Global do Metano de redução de 30% das emissões de metano até 2030.

Para atingir essa meta é necessário, entre outras práticas, zerar o desmatamento ilegal e o fogo associado a ele, reduzir o uso de lenha para cocção, controlar as emissões fugitivas da indústria de petróleo e gás, recuperar pelo menos 50% de todo metano gerado nos aterros sanitários, ampliar a recuperação de metano do tratamento de resíduos animais, alcançar 30% de terminação intensiva do rebanho bovino de corte, conversão de 75% do cultivo de arroz para preparo antecipado e cortar pela metade a prática de queima da palha de cana-de-açúcar ainda existente.

Essa meta pode ser alcançada com políticas regulatórias, de capacitação e de incentivos econômicos nos setores público e priva

* O setor de Processos Industriais e Uso de Produto não foi tratado neste exercício, devido à sua relativa baixa contribuição nas emissões nacionais de metano (0,22% em 2020, de acordo com os dados do SEEG).



Sumário

1. Introdução: entendendo as emissões de metano	13
1.1. A evolução da concentração de metano na atmosfera	13
1.2. Participação do metano nas emissões de gases de efeito estufa	14
1.3. O que gera as emissões de metano.....	14
1.3.1. Agropecuária.....	15
1.3.2. Mudanças de uso da terra e florestas	19
1.3.3. Resíduos	22
1.3.4. Energia.....	23
1.3.5. Processos industriais e uso de produtos	23
1.4. Compromisso Global do Metano	24
2. Panorama das emissões de metano	25
2.1. Emissões gerais.....	25
2.2. Agropecuária	26
2.3. Mudanças de uso da terra e florestas	31
2.4. Tratamento de resíduos.....	39
2.5. Energia	42
2.6. Processos Industriais e uso de produtos.....	44
3. Medidas para o Brasil reduzir as emissões	45
3.1. Agropecuária	45
3.1.1. Tratamento de dejetos animais (TDA) da produção pecuária.....	45
3.1.2. Terminação intensiva (TI).....	46
3.1.3. Melhoramento genético animal (MGA).....	47
3.1.4. Melhoramento e manipulação da dieta animal	48
3.1.5. Manipulação da fermentação ruminal	49
3.1.6. Práticas de manejo no cultivo de arroz irrigado	50
3.1.7. Redução da queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar	51
3.1.8. Outras formas de mitigação de metano na produção agropecuária	52
3.2. Mudanças de uso da terra e florestas	52
3.3. Tratamento de resíduos.....	53
3.4. Setor de energia.....	56
4. Meta para a redução das emissões de metano	58
4.1. Agropecuária	58
4.2. Mudanças de uso da terra e florestas	62
4.3. Resíduos.....	66
4.4. Setor de energia.....	68
4.5. Meta agregada de todos os setores	71
5. Considerações Finais	73
Agradecimentos	74
Referências Bibliográficas	75

Lista de Tabelas

Tabela 1. Emissões de metano (CH ₄) por subsetor e suas respectivas fontes entre o ano de 1990 e 2020	28
Tabela 2. Emissões de metano (CH ₄) por fontes entre o ano de 1990 e 2020.....	30
Tabela 3. Características das usinas hidrelétricas e seus reservatórios levantadas pelo estudo de Demarty e Bastien (2011).....	33
Tabela 4. Cálculo das emissões de metano por reservatórios a nível Tier 1, baseado no método e nos fatores do IPCC (2019).	34
Tabela 5. Áreas queimadas consideradas e não consideradas no presente exercício, para as queimadas não associadas ao desmatamento, obtidas na plataforma da iniciativa MapBiomas Fogo (https://mapbiomas.org/), assim como os fatores de emissão e combustão associados a cada classe, de acordo com o MCTI (2020) e o IPCC (2006)	36
Tabela 6. Emissão de metano por tipo de tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos em 2020	39
Tabela 7. Detalhamento das emissões do setor de resíduos	40
Tabela 8. Fatores de emissão para aquecimento direto residencial.....	56
Tabela 9. Considerações para o cálculo do potencial de mitigação de cada estratégia de mitigação adotada para os cenários de emissões BAU, Meta e Potencial	60
Tabela 10. Emissões de metano (tCH ₄ /ano) por subsetor de agropecuária para os cenários BAU e Meta projetados até 2030.....	61
Tabela 11. Dados utilizados para cálculo dos cenários futuros de queimadas associadas e não associadas a desmatamento	63
Tabela 12. Descrição dos cenários propostos para o setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas e seus critérios	64
Tabela 13. Trajetória de emissões brutas (milhões de toneladas) de metano considerada nos cenários projetados (BAU e META) para queimadas associadas e não associadas ao desmatamento, incluindo o potencial máximo de redução para 2030.....	65
Tabela 14. Opções de mitigação para o setor de resíduos.....	66
Tabela 15. Projeções de emissão de metano por cenário para o setor de resíduos	67
Tabela 16. Premissas adotadas para os cenários no Setor de Energia.....	69
Tabela 17. Projeções de emissões de metano do Setor de Energia	70
Tabela 18. Emissões históricas e cenários para emissão de metano (2010-2030)	71

Lista de Figuras

Figura 1. Quantidade global média de metano (1984-2019), partes por bilhão ...	14
Figura 2. Rota da emissão de metano pelo processo digestivo animal em que ocorre a fermentação entérica	16
Figura 3. Rota da emissão de metano pela adoção de diferentes tipos de sistema de manejo de dejetos de animais.....	17
Figura 4. Rota da emissão de metano pelo cultivo de arroz irrigado em regime de inundação	18
Figura 5. Rota da emissão de metano pela prática de queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar.....	18
Figura 6. Componentes antrópicos das emissões de metano no setor Mudanças de Uso da Terra e Florestas.....	19
Figura 7. Fontes de metano em áreas alagadas e contabilização do componente antrópico das emissões; e mecanismos relacionados a emissões em reservatórios artificiais.....	20
Figura 8. Fontes de metano relacionadas a queimadas e contabilização do componente antrópico das emissões.....	21
Figura 9. Emissões de Metano no Brasil por Setor (1990 – 2020)	25
Figura 10. Emissões de metano do Brasil.....	25
Figura 11. Evolução da emissão de metano na agropecuária e os valores das emissões por fonte de 1990 até 2020.....	27
Figura 12. Evolução da emissão de metano na agropecuária e os valores das emissões por fonte de 1990 até 2020.....	27
Figura 13. Evolução da emissão de metano pelas fontes da agropecuária e seus valores de emissões de 1990 até 2020.....	30
Figura 14. Ranking das emissões de metano estaduais do setor agropecuário em 2020.....	31
Figura 15. Emissões de metano por queima de resíduos de vegetação nativa em cada bioma brasileiro entre 1990 e 2020	35
Figura 16. Área queimada no Brasil em cada classe entre 1990 e 2020, segundo o MapBiomas Fogo.....	37
Figura 17. Emissões de metano por queima em vegetação nativa (formação florestal, savânica, campestre e áreas úmidas) e em classes de uso antrópico (pastagem e área agrícola) em cada bioma brasileiro no período de 1990 a 2020, de acordo com a área queimada classificada pela iniciativa MapBiomas Fogo.....	37
Figura 18. Emissões de metano associadas e não associadas a desmatamento no Brasil, no período entre 1990 e 2020.....	38

Figura 19. Perfil de emissões de metano estimadas para o ano de 2020 no setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas, com relação à queima de resíduos associados ao desmatamento e à queimadas não associadas ao desmatamento no Brasil	38
Figura 20. Contribuição nas emissões de metano por subsetor no tratamento de resíduos	39
Figura 21. Perfil de emissões de metano no tratamento de resíduos para o período de 1990 a 2020	40
Figura 22. Evolução das emissões do setor de resíduos por fonte	41
Figura 23. Evolução das emissões do setor de resíduos por fonte	41
Figura 24. Evolução histórica das emissões de metano do Setor de Energia....	42
Figura 25. Evolução histórica das emissões de metano pela queima de combustíveis	43
Figura 26. Evolução histórica das emissões fugitivas de metano	43
Figura 27. Porcentagem de área de cultivo de cana-de-açúcar com colheita manual	51
Figura 28. Emissões de metano (mil tCH ₄ /ano) por setor de agropecuária para os cenários BAU, Meta e Potencial projetados até 2030	61
Figura 29. Distribuição mensal das áreas queimadas nos biomas Cerrado e Pantanal no total do período de 1985 a 2020, segundo o MapBiomas Fogo, usada para definir os períodos de queimadas naturais durante a estação chuvosa: de novembro a abril para o Cerrado e de janeiro a maio no Pantanal	63
Figura 30. Cenários de trajetória das emissões brutas de metano por queimadas associadas (A) e não associadas (B) ao desmatamento, considerando o cenário business-as-usual (BAU), as metas propostas e o potencial máximo de redução	64
Figura 31. Projeções consolidadas das emissões de metano do setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas, considerando o total das estimativas (queimadas associadas e não associadas a desmatamento), incluindo o histórico de 2005 a 2020 (SEEG), o cenário business-as-usual (BAU) e a meta até 2030, e o potencial máximo de redução	65
Figura 32. Projeções das emissões de metano do setor de resíduos, considerando o histórico até 2020 (SEEG), cenário business-as-usual (BAU) e Meta.	67
Figura 33. Projeções das emissões de metano do setor de resíduos, considerando o cenário e o potencial que o setor tem de redução	68
Figura 34. Estimativas e projeções de emissões de metano no Setor de Energia	70
Figura 35. Estimativas e projeções de emissões de GEE residencial.....	71
Figura 36. Emissões nos cenários BAU, Meta e Potencial.....	72



1 Introdução: Entendendo as Emissões de Metano

O metano (CH_4) é um gás de efeito estufa poderoso. Seu potencial efeito de aquecimento global num período de 100 anos (GWP-100) é equivalente a 28 vezes o do dióxido de carbono (CO_2), ou seja, uma tonelada de metano equivale a 28 tCO₂e (toneladas equivalentes de gás carbônico GWP-100)³.

A concentração atmosférica do metano mais que dobrou desde os tempos pré-industriais (Nisbet et al., 2019). Esse gás perdeu apenas para o dióxido de carbono na alteração do clima da Terra durante a era industrial (Myhre et al., 2013). O metano é um poluente climático de vida curta (SLCP) com um tempo de vida atmosférico de aproximadamente 12 anos (Unep, 2021). O metano também contribui para a formação de ozônio troposférico (O_3), que, como ele, é um gás de efeito estufa de curta duração, mas potente. O chamado ozônio de superfície também é um poluente do ar com efeitos prejudiciais para as pessoas, ecossistemas e cultivos agrícolas.

Embora não seja diretamente perigoso para a saúde humana, ele afeta indiretamente a produtividade agrícola por meio do ozônio e das mudanças climáticas. Estudos recentes descobriram que essas consequências para a saúde e danos agrícolas (Shindell et al., 2019) são maiores do que se acreditava anteriormente. Esses novos estudos incluem a descoberta de que o ozônio troposférico pode ter impactos muito maiores na saúde pública, particularmente nas mortes por doenças respiratórias e cardiovasculares (Turner et al., 2016). Além disso, a compreensão do efeito do metano no forçamento radiativo melhorou recentemente, levando a uma revisão para cima desde o Quinto Relatório de Avaliação Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (Collins et al. 2018; Etminan et al. 2016).

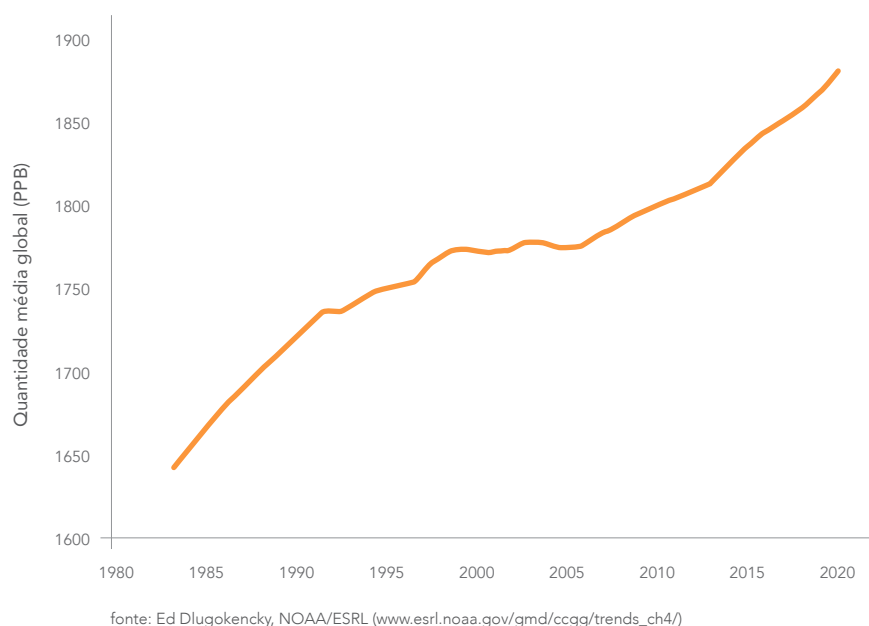
1.1. A evolução da concentração de metano na atmosfera

As observações do teor de metano atmosférico exibem um padrão de aumento desde 1982 até 2000, um período de estabilização entre 2000 e 2007 e um novo acréscimo a partir de 2007 (Turner et al. 2019).

Grandes incertezas estão associadas às razões por trás desse padrão, mas há indícios de que a queima de combustíveis fósseis não seja responsável por esse aumento mais recente de metano, já que o teor do isótopo de metano relacionado a essas fontes não acompanha o aumento (Lan et al., 2021). Dessa forma, fontes de metano não relacionadas à queima de combustíveis fósseis são suspeitas de ser responsáveis pela elevação mais recente. No entanto, não está claro se se trata de variações naturais, que são grandes em escalas anuais, se são causadas em parte pelo El Niño ou se são causadas por um mecanismo de feedback positivo entre as mudanças climáticas que já vêm ocorrendo (Turner et al., 2019).

³ O potencial de aquecimento global (Global Warming Potential - GWP) é calculado e publicado nos relatório de avaliação (Assessment Reports - AR) do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). O último assessment report - AR6 considera a média de 28 tCO₂e mas apresenta os valores específicos para metano de origem fóssil (29,8) e não fóssil (27,2).

Figura 1.
Quantidade global média
de metano (1984-2019),
partes por bilhão



Na COP26, em Glasgow, Escócia, mais de cem países assinaram o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*)⁴, e se comprometeram a reduzir as emissões de metano em 30% até 2030 (com base nos níveis de 2020). Isso põe pressão nos países e nos cientistas para compreender os padrões, as causas e os fatores de mitigação mais importantes, para que essa meta seja cumprida.

1.2 Participação do metano nas emissões de gases de efeito estufa

A emissão global de metano chegou a 364 milhões de toneladas em 2020 (Unep, 2021) o que representa 10 GtCO₂e (GWP AR5) ou 16% das emissões globais de gases de efeito estufa em CO₂e.

Já as emissões brasileiras de metano em 2020 foram estimadas pelo SEEG em 20,2 milhões de toneladas em 2020, o que corresponde a 565 MtCO₂e ou 26% das emissões totais de GEE (gases de efeito estufa) do país.

Enquanto no total o Brasil representa 3,3% das emissões globais de GEE, no caso do metano o país representa 5,5% das emissões globais.

5,5%

das emissões
globais de
metano vêm
do Brasil

1.3. O que gera as emissões de metano

Existem fontes naturais e antrópicas de metano. Entre as naturais estão a atividade vulcânica, a decomposição de material orgânico (em especial sob condições anaeróbicas), o processo de digestão de animais herbívoros (especialmente os ruminantes) e as queimadas em vegetação nativa e em áreas de agropecuária.

Mais da metade das emissões globais de metano, contudo, deriva das atividades humanas como a agropecuária (40% das emissões de origem antrópica), queima de combustíveis fósseis (35%) e manejo de resíduos (20%)⁵.

⁴ <https://www.globalmethanepledge.org/>

⁵ UNEP – Global Methane Assessment - pg 6 - https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35917/GMA_ES.pdf



1.3.1. Agropecuária

O metano é o principal gás emitido pelo setor agropecuário, com suas fontes de emissão podendo ser classificadas de acordo com as atividades produtivas de pecuária e agricultura. Na pecuária, as emissões são resultantes dos rebanhos e a forma como os dejetos animais são manejados, com suas emissões contabilizadas pelos subsetores de fermentação entérica e manejo de dejetos animais, respectivamente. Na agricultura, as emissões ocorrem devido às formas de uso e manejo do solo das lavouras de arroz irrigado, cana-de-açúcar e algodão herbáceo. O subsetor de cultivo de arroz contabiliza as emissões de metano da produção de arroz em regime irrigado contínuo e intermitente. Já para cana-de-açúcar e algodão herbáceo, a emissão se deve à queima dos resíduos agrícolas, mensurados pelo subsetor de mesmo nome (MCTI, 2020a).

FERMENTAÇÃO ENTÉRICA

O gás metano é um subproduto da fermentação entérica, processo que ocorre na digestão realizada por animais herbívoros (IPCC, 2006), na qual os carboidratos celulósicos presentes nas paredes celulares das plantas são ingeridos e decompostos por um processo anaeróbico pelos microrganismos presentes no sistema digestivo desses animais. Resultante desse processo, o metano acaba sendo expelido principalmente por eructação (aroto), além da respiração e pelo ânus (Martin et al., 2010).

A quantidade de metano liberado depende do tipo de sistema digestivo dos animais. Os animais ruminantes, como os bovinos, bubalinos, caprinos, ovinos e camelídeos, têm o estômago dividido em quatro compartimentos, entre eles o rúmen, órgão capaz de fazer a digestão da celulose presente em seus alimentos. Os ruminantes são mais emissores do que os não ruminantes, aqueles que não possuem o rúmen, justamente por digerir o alimento por mais tempo e estender o processo de fermentação entérica (IPCC, 2006). Cerca de 95% do metano produzido pelos animais ruminantes é emitido via eructação. Dos 5% restantes, aproximadamente 89% é emitido por meio da respiração e 11% pelo ânus (MCTI, 2020b).

Os microrganismos presentes no rúmen fermentam os carboidratos presentes na celulose, produzindo ácidos graxos voláteis (AGV), o que garante mais de 70% da necessidade energética do animal. Essa produção de AGV resulta na produção de hidrogênio (H_2), o qual acaba sendo convertido em metano pelos microrganismos metanogênicos (Vijn et al., 2020).

Já os animais não ruminantes, como os equinos, muares, asininos e suínos, são monogástricos e a geração de metano é feita no ceco, parte do seu sistema digestivo capaz de digerir a celulose (MCTI, 2020b).

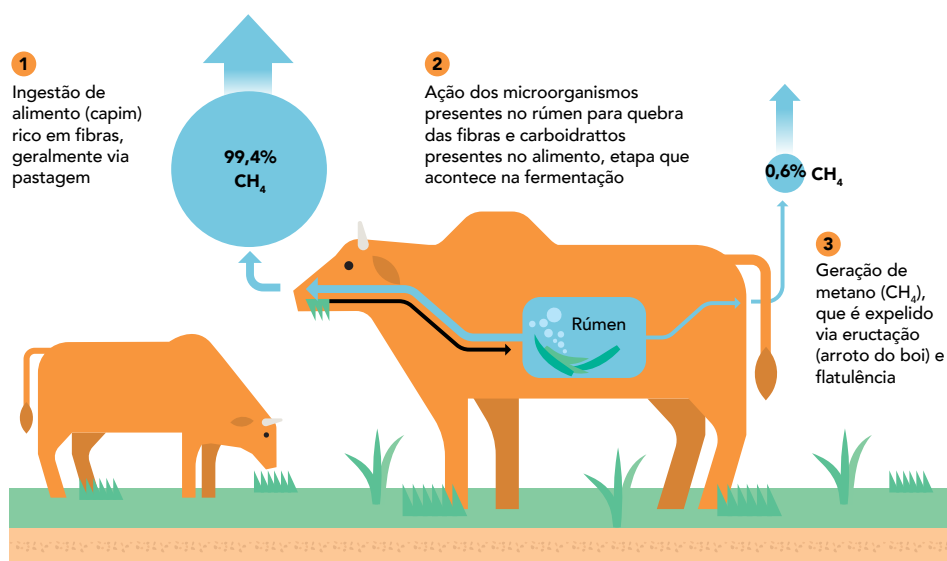
Além do tipo de animal, também influenciam as emissões de metano variáveis como o sexo, idade, peso e sua dieta, considerando o tipo de alimento, quantidade e qualidade. Para isso, são contabilizados somente os rebanhos em manejo doméstico, para os cálculos das emissões de metano dessas populações de animais (IPCC, 2006).

95%

do metano
produzido por
ruminantes
é eliminado
por eructação
("aroto")



Figura 2.
Rota da emissão de metano pelo processo digestivo animal em que ocorre a fermentação entérica.



MANEJO DE DEJETOS ANIMAIS

Ainda na pecuária, os diferentes tipos de sistemas de produção animal também geram emissões de metano devido ao tipo de manejo de dejetos gerados ao longo do ciclo de vida dos rebanhos (Costa Junior et al., 2013).

O metano é o gás emitido em maior quantidade pelo manejo dos dejetos, resultante das etapas dos processos de tratamento. Há também, em menor parte, a emissão de óxido nitroso, que ocorre de forma direta e indireta, durante as etapas de tratamento e disposição. A emissão direta de óxido nitroso está associada com o tempo de duração do armazenamento e tratamento dos dejetos, em que ocorre o processo de nitrificação (oxidação da amônia em nitrito e depois em nitrato) e de desnitrificação (conversão do nitrato em gás nitrogênio), juntamente com o teor de nitrogênio e carbono dos dejetos. Já as emissões indiretas, são decorrentes do tempo de tratamento e da temperatura em que ocorrem, com perda de nitrogênio devido à sua volatilização, em grande parte na forma de amônia e óxidos de nitrogênio (MCTI, 2020c). As emissões de metano geradas pelo esterco estão associadas à quantidade produzida e a sua parcela que se decompõem de forma anaeróbica (IPCC, 2006).

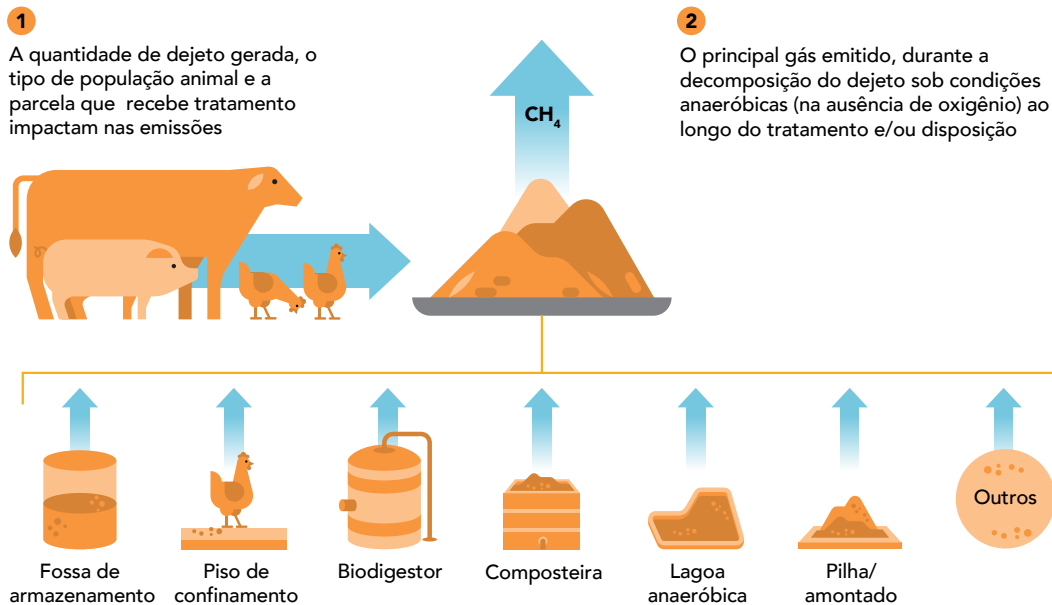
O manejo dos dejetos envolve a forma de coleta, armazenamento, tipo de tratamento e possíveis formas de uso pelo próprio setor. No Brasil, os animais geralmente são mantidos em pastagem e áreas como currais, galpões e estábulos, locais onde os dejetos são depositados e manejados para somente então ser utilizados na agricultura ou permanecer no próprio pasto. O manejo e tratamento do dejetos pode ser voltado para a parte sólida ou líquida, com a utilização de lagoas anaeróbicas, biodigestor anaeróbico, armazenamento sólido em pilhas a céu aberto, fossa de armazenamento no local de geração ou fora, compostagem e com a presença ou não de cama coletora de dejetos para aves (MCTI, 2020c).

Em geral, o período de retenção desses dejetos e a temperatura em que operam influenciam na quantidade emitida de metano, com os sistemas de manejo sólido emitindo menos devido a sua decomposição ocorrer em ambiente menos anaeróbico, como no caso dos dejetos depositados em pastagens (IPCC, 2006).



Figura 3.

Rota da emissão de metano pela adoção de diferentes tipos de sistema de manejo de dejetos de animais.



CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

A emissão de metano na produção de arroz é gerada pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica em sistemas irrigados, onde ocorre a inundação do solo. A quantidade emitida de metano está vinculada ao tamanho da área cultivada, assim como o tempo e tipo de irrigação, além da forma de preparo do solo antes do seu cultivo. A produção de arroz também gera emissões de óxido nitroso, por meio da conversão do nitrogênio presente no solo por microrganismos e pela decomposição de seus resíduos agrícolas, sendo que somente a emissão por seus resíduos é contabilizada no subsetor de Solos Manejados (IPCC, 2006).

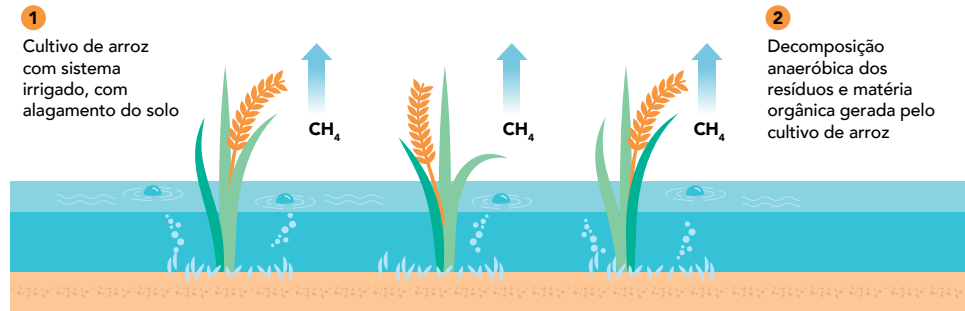
No Brasil, cerca de 92% da produção de arroz é pelo sistema irrigado, representando 77% da área total de cultivo de arroz. O restante é produzido sem alagamento do solo, o que não gera emissão de metano (Embrapa Arroz e Feijão, 2022). Dos diferentes tipos de irrigação, predomina o de inundação contínua do solo, representando quase a totalidade da área irrigada. Além disso, ocorre a inundação intermitente com aeração (irrigação seguida da secagem do solo) única e com múltiplas aerações (MCTI, 2020d).

92%

da produção de arroz no Brasil é feita pelo sistema irrigado



Figura 4.
Rota da emissão de metano pelo cultivo de arroz irrigado em regime de inundação.

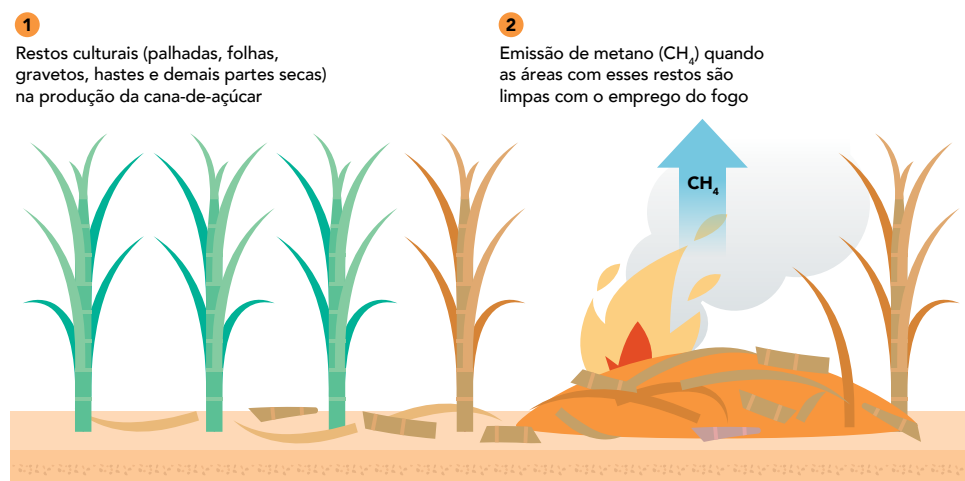


QUEIMA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os resíduos agrícolas são compostos principalmente por palhadas, folhas, gravetos, hastes e demais partes secas e sem valor econômico da biomassa da cultura produzida. As emissões de metano são geradas a partir do uso do fogo como meio de realizar o manejo desses resíduos, com a sua queima variando de acordo com tipo de cultura e o modelo de prática agrícola utilizado (IPCC, 2006).

A queima dos resíduos agrícolas tem a finalidade de facilitar a limpeza da lavoura e a realização da colheita, além do efeito fitossanitário ao evitar e combater possíveis pragas e doenças. Apesar dessas facilidades, a combustão desses resíduos é responsável não somente pela emissão de metano, mas também de outros gases como o óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrogênio (NO_x) e o monóxido de carbono (CO), além de efeitos sobre a qualidade do ar, afetando diretamente a saúde pública. No Brasil, são contabilizadas as emissões provenientes das culturas de cana-de-açúcar e algodão herbáceo. Para a cana-de-açúcar, o uso do fogo está associado principalmente às áreas onde ainda ocorre a colheita manual, com a queima podendo ainda ser feita antes da colheita. Já para o algodão herbáceo, a queima era realizada principalmente para o controle das pragas, prática que foi extinta com a modernização pela qual o setor passou na década de 1990 (MCTI, 2020e).

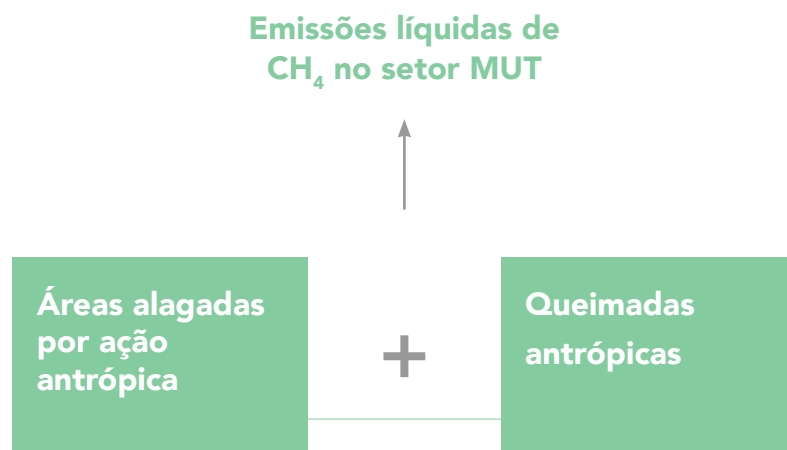
Figura 5.
Rota da emissão de metano pela prática de queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar.



1.3.2. Mudanças de uso da terra e florestas

As emissões de metano relacionadas ao setor de mudanças de uso da terra e florestas são provenientes da decomposição de matéria orgânica em ambiente anóxico (sem oxigênio) pela microbiota metanogênica, presente em áreas úmidas, lagos e reservatórios (Moore & Knowles, 1989), e da queima de matéria orgânica associada ao uso da terra (Koppmann et al., 2005). Áreas úmidas incluem turfeiras e florestas e campos inundáveis, e as emissões que ocorrem nesses ambientes são fontes naturais de metano (Watson et al., 2000); já as emissões ocasionadas pelo represamento de rios e formação de reservatórios artificiais são causadas pela ação humana (IPCC, 2019). Da mesma forma, as queimadas podem ser de origem antrópica ou natural, principalmente em biomas como o Cerrado e Pantanal, no Brasil. Para contabilização do componente antrópico das emissões de CH_4 , portanto, seria necessária a quantificação de emissões líquidas relacionadas às atividades antrópicas, descontando aquelas emissões de metano que ocorrem naturalmente tanto em áreas úmidas e alagadas quanto em áreas queimadas.

Figura 6.
Componentes antrópicos das emissões de metano no setor Mudanças de Uso da Terra e Florestas.



ÁREAS ÚMIDAS

As maiores incertezas no balanço de metano atmosférico global estão relacionadas às áreas úmidas, pois as emissões nesses locais apresentam uma dinâmica ainda pouco conhecida. Sem entender como se dá a dinâmica natural, é difícil entender qual parte é consequência sobre o balanço de metano das alterações antrópicas nos ecossistemas. No entanto, sabe-se que mudanças no uso da terra alteram as comunidades microbianas em áreas úmidas e podem transformá-las em fontes de metano. De forma geral, a drenagem de áreas úmidas favorece as emissões de CO_2 , enquanto o alagamento de áreas previamente não inundáveis promove emissões de CH_4 (Pangala et al., 2017).



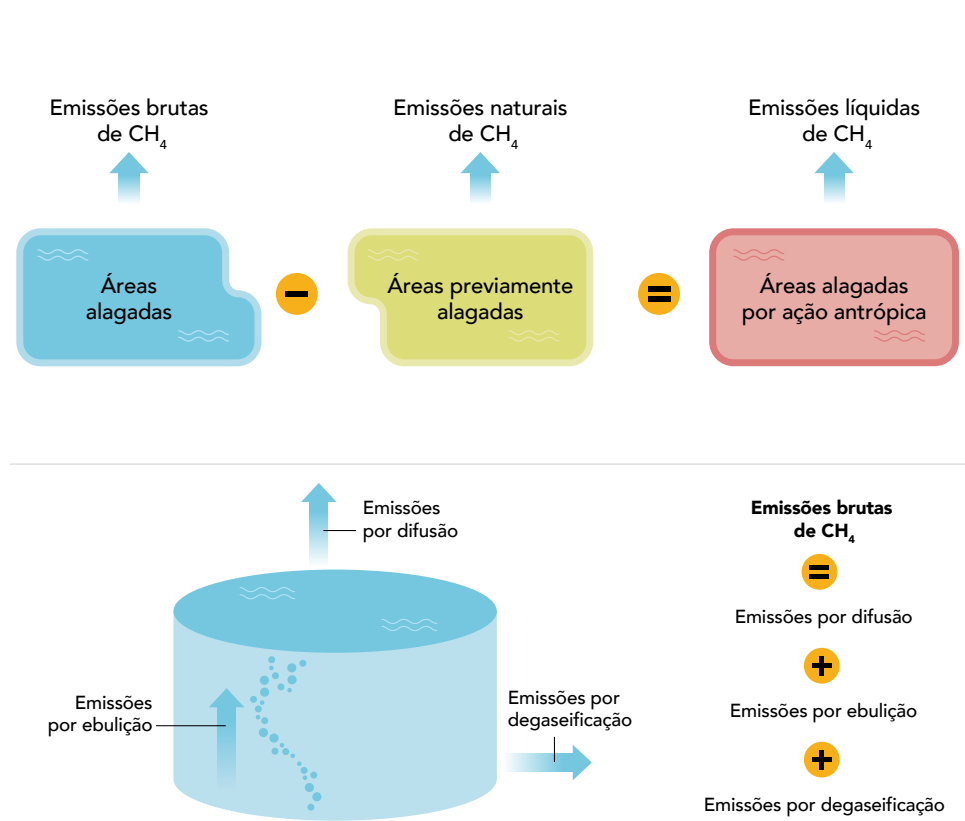
RESERVATÓRIOS

Usinas hidrelétricas (UHEs) e seus reservatórios podem emitir de forma significativa dióxido de carbono e metano e alguns estudos têm mostrado que hidrelétricas podem poluir mais que usinas a gás, óleo e carvão (De Faria et al., 2015). As emissões de metano ocorrem devido ao alagamento de grandes quantidades de estoque de carbono na vegetação e de matéria orgânica no solo, que vão decompor em ambiente anóxico após o enchimento da barragem.

Emissões de metano em reservatórios de hidrelétricas podem se dar de três formas (IPCC, 2006):

1. Por difusão molecular através da interface ar-água na superfície do lago;
2. Por ebulição, em forma de bolhas que partem do sedimento depositado no fundo do reservatório e sobem diretamente pela coluna d'água;
3. Por degaseificação, que consiste na difusão molecular entre o ar e a água de forma acelerada, causada pela passagem da água pelas turbinas.

Figura 7. Fontes de metano em áreas alagadas e contabilização do componente antrópico das emissões; e mecanismos relacionados a emissões em reservatórios artificiais.



No entanto, há controvérsias sobre o papel dos reservatórios de grandes usinas hidrelétricas (UHEs) para as emissões de metano (Dos Santos et al., 2017; Fearnside, 2013). Estudos que comparam emissões por difusão na superfície de reservatórios concluíram que as emissões de metano em hidrelétricas são quase sempre menores que as emissões geradas por termelétricas (Rosa et al., 2004). Fearnside (2013; 2015), por outro lado, discute que não considerar as emissões geradas por ebulição (bolhas produzidas no fundo do reservatório) e principalmente pela passagem da água pelas turbinas (degaseificação) pode subestimar muito as emissões, o que já havia sido indicado por outros estudos (Kemenes et al., 2007). De fato, o maior e mais longo estudo de emissões de metano em uma hidrelétrica tropical, a Petit Saut, na Guiana Francesa, indicou emissões de metano significativas, especialmente pelo processo de degaseificação nas turbinas (Demarty & Bastien, 2011).

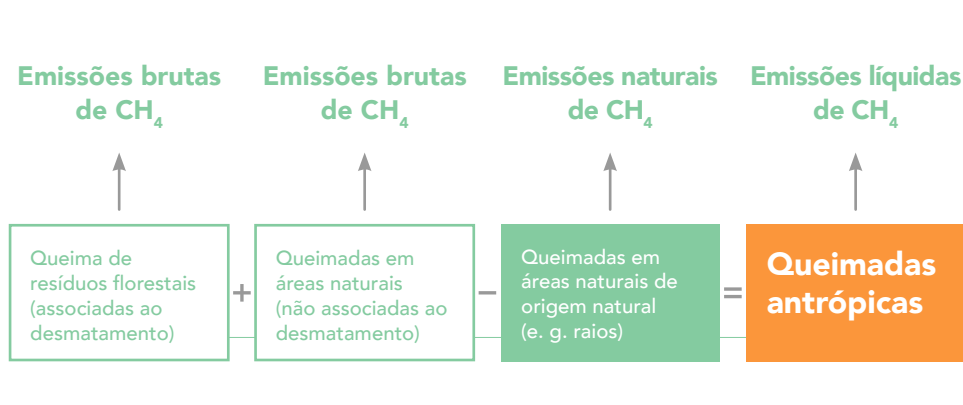
Além disso, o metano permanece na atmosfera em média cerca de um décimo do tempo do CO₂ (Myhre et al., 2013). A consideração da janela temporal adequada para a comparação das emissões em reservatórios com emissões pela queima de combustíveis fósseis é, portanto, essencial. Quanto maior o horizonte de tempo usado para a comparação, menor o impacto atribuído às hidrelétricas, pois além de uma menor meia-vida na atmosfera, as emissões de metano pelos reservatórios decaem com o tempo (Fearnside, 2016) e, após cerca de uma década vão se estabilizar e permanecer equivalentes à quantidade de matéria orgânica que entra continuamente no sistema (Demarty & Bastien, 2011).

QUEIMADAS

Outra fonte de emissões de metano relacionada ao setor de mudanças de uso da terra e florestas é a queima de matéria orgânica. Essas emissões são mais facilmente calculadas e dependem de fatores de emissão específicos para cada tipo de vegetação e do estoque de carbono local. As queimadas podem ser de origem natural, como as causadas por raios, por exemplo, e a classificação das queimadas antrópicas versus de origem natural não é tão simples, principalmente em ecossistemas tolerantes ao fogo, que evoluíram com a presença do fogo natural (Cerrado e Caatinga). No entanto, sabe-se que a grande maioria das queimadas atualmente, mesmo nesses biomas, é de origem antrópica (Schumacher et al., 2022).

Além disso, a queima de resíduos da vegetação nativa após o desmatamento de uma área também é uma fonte importante de metano no Brasil, e já é atualmente contabilizada no Inventário Nacional (MCTI, 2020f), assim como no SEEG.

Figura 8.
Fontes de metano relacionadas a queimadas e contabilização do componente antrópico das emissões.



1.3.3. Resíduos

O setor inclui emissões de metano (CH_4) e outros gases de efeito estufa provenientes dos serviços de saneamento. São consideradas emissões exclusivamente relacionadas com o tratamento de resíduos sólidos e de efluentes líquidos. Em especial, as atividades fontes de emissão são desagregadas em: disposição final de resíduos em aterros sanitários e outros tipos de disposição; a incineração de resíduos de serviços de saúde (RSS) e queima a céu aberto de resíduos sólidos; e o tratamento e afastamento de efluentes líquidos domésticos e industriais.

DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS

A disposição final de resíduos sólidos municipais produz quantidades significativas de metano, por meio da decomposição da fração orgânica degradável do resíduo em condições anaeróbicas. O potencial de geração de CH_4 dos resíduos sólidos é estimado a partir da análise da composição gravimétrica, do tipo de gestão adotada nos locais de disposição final – lixões, aterros controlados ou aterros sanitários – índices de precipitação, temperatura e da quantidade de material encaminhada para cada tipo de destino.

TRATAMENTO BIOLÓGICO

O tratamento biológico consiste na degradação do carbono orgânico por meio de processos como compostagem e digestão anaeróbica. A compostagem é um processo aeróbico, no qual a fração orgânica dos resíduos é convertida em CO_2 , CH_4 (nas seções anaeróbicas do composto) e numa pequena fração de N_2O . Já a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos acelera a decomposição natural de matéria orgânica sem oxigênio, propiciando a geração de CH_4 .

QUEIMA A CÉU ABERTO

A incineração é um processo termoquímico de tratamento de resíduos. Ela consiste na combustão de resíduos sólidos e líquidos em plantas controladas, com consequente redução do volume e das características de periculosidade dos resíduos. Nesse processo as emissões de CH_4 não são estimadas, uma vez que o fator de emissão padrão para incineradores é zero. Já a queima a céu aberto, definida como a combustão de materiais combustíveis ao ar livre ou em lixões abertos com as emissões são lançadas diretamente na atmosfera, sem passar por uma chaminé de filtragem, é responsável pela emissão de CH_4 .

EFLUENTES LÍQUIDOS DOMÉSTICOS E INDUSTRIAIS

O efluente doméstico tem alto teor de carga orgânica que, quando degradada, pode gerar significativa emissão de CH_4 . Essas emissões diferem conforme o tipo de tratamento aplicado, atingindo maiores quantidades com tratamentos em meios anaeróbios. Já os efluentes industriais apresentam diferentes cargas de material orgânico, dependendo do setor do processo industrial. Podendo ser responsável por emitir quantidades significativas de CH_4 dependendo das condições sob os tipos de tratamento adotados.



1.3.4. Energia

A produção e o consumo de energia geram emissões de metano pela queima de combustíveis e por emissões fugitivas.

Na queima de combustíveis, a energia química contida no combustível é liberada como calor, que pode ser destinado diretamente ao uso final (fornos, aquecedores etc.) ou convertido em energia elétrica ou mecânica, tal como ocorre na geração termelétrica e em fontes móveis (veículos). Idealmente, em uma combustão completa, todo o carbono (C) armazenado nos combustíveis é oxidado e emitido como dióxido de carbono (CO₂). No entanto, o que acontece na realidade é a combustão incompleta, onde são emitidos, em menores quantidades do que o CO₂, outros gases, dentre eles o metano.

As emissões fugitivas decorrem de descargas, intencionais e não intencionais, de gases provenientes dos processos produtivos de carvão mineral, petróleo e gás natural. Elas ocorrem em várias etapas dos processos produtivos: extração, estocagem, processamento e transporte dos combustíveis.

Na indústria de petróleo e gás natural, as emissões fugitivas são agrupadas em três tipos de atividade⁶:

- 1. Extração e produção:** *venting* (liberação intencional de gás para regular a pressão de um processo), *flaring* (queima intencional de gás para regular a pressão de um processo), tanques de *flash* de metano, processo de desidratação a glicol, remoção de CO₂ do gás (colunas de MEA e DEA), passagem de *pig* em linhas (para inspeção ou limpeza) e fugitivas em componentes de linha como conectores, válvulas e outros, atividades de perfuração, derramamento de petróleo em canaletas, despressurização e limpeza de tanques e vasos;
- 2. Refino ou processamento:** regenerador de UFCC (Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido), unidades de geração de hidrogênio (UGH), fugitivas de componentes de linha como conectores, válvulas e

outros, *flaring*, *venting*, processo de desidratação a glicol e passagens de *pig* em linhas;

- 3. Transporte:** despressurização de linhas, fugitivas de componentes de linha como conectores, válvulas, flanges e outros, vazamentos em gasodutos, *venting*, *flaring*, *flash* de metano em tanques, passagem de *pig* em linhas e carga de caminhões ou vagões.

No processo geológico de formação do carvão mineral, que ocorre ao longo de milhões de anos, há a formação de gás metano, que permanece aprisionado junto ao mineral sólido. O gás é liberado quando o carvão é exposto à atmosfera, o que ocorre durante a escavação das minas para sua extração.

1.3.5. Processos industriais e uso de produtos

As atividades industriais podem gerar emissões atmosféricas pela queima de combustíveis (geração de calor ou energia elétrica), pela disposição de resíduos (tratamento de efluentes industriais e incineração) e por processos de transformação química e/ou física de materiais. Para cada um desses processos, as emissões variam de acordo com o produto, os insumos que alimentam os processos, o tipo de rota tecnológica utilizado na produção, os equipamentos da planta industrial e os níveis de eficiência, entre outros. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) categoriza como processos industriais e uso de produtos (PIUP) exclusivamente as emissões ocorridas nas transformações químicas ou físicas de materiais. Assim, as emissões por queima de combustíveis são alocadas no "setor de energia", e as emissões pela disposição de resíduos, no "setor de resíduos". No setor de PIUP, as emissões de metano são estimadas na produção de metais (produção de ferro-gusa e aço, produção de ferroligas e produção de outros metais não ferrosos) e na indústria química (produção de metanol, eteno, óxido de eteno, acrilonitrila, dicloroetano, cloreto de vinila, coque de petróleo calcinado e negro-de-fumo)⁷.

⁶ Relatório de Referência "Setor Energia - Subsetor Emissões Fugitivas - Categoria Petróleo e Gás Natural" (MCTI/PETROBRAS, 2020), parte integrante do 4º Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.

⁷ SEEG, 2021 - Nota Metodológica, Processos Industriais e Uso de Produtos, disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Notas%20Metodologicas/SEEG_9%20%282021%29/SEEG9_NotaMetodologica_PIUP_2021.10.26.pdf [acesso em 23 de março de 2022]



1.4. Compromisso Global do Metano

O Compromisso Global do Metano é uma iniciativa originada em uma articulação dos EUA e Comunidade Europeia e anunciada em setembro de 2021, convidando os países para reduzir as emissões desse gás de efeito estufa. Em novembro do mesmo ano, durante a COP26, uma centena de países aderiram ao acordo, que até setembro de 2022 contava com 122 países signatários, incluindo o Brasil.

30%

de redução até 2030 em relação a 2020 foi o compromisso adotado em Glasgow em 2021

Os participantes que aderirem ao compromisso concordam em adotar ações voluntárias para contribuir com um esforço coletivo para reduzir as emissões globais de metano em pelo menos 30% até 2030 em relação aos níveis de 2020, o que poderia evitar 0,2°C de aquecimento da Terra até 2050.

Os participantes também se comprometeram a usar as melhores práticas de inventário de acordo com o IPCC, bem como trabalhar para melhorar continuamente a precisão, transparência, consistência, comparabilidade e integridade dos relatórios nacionais de inventário de gases de efeito estufa sob a UNFCCC e o Acordo de Paris.

O compromisso visa a catalisar a ação global e fortalecer o apoio às iniciativas internacionais existentes de redução de emissões de metano para avançar no trabalho técnico e político que servirá para sustentar as ações domésticas.

Embora não preveja metas para os países, o compromisso envolve a adoção de ações domésticas abrangentes para atingir a meta global, concentrando-se em alcançar todas as reduções viáveis nos setores de energia e resíduos e buscar a redução das emissões agrícolas por meio de inovação tecnológica, bem como incentivos e parcerias com agricultores.

Anualmente, a partir de 2022 acontecerão reuniões ministeriais para avaliar o progresso em relação à meta do acordo de metano. Embora não seja uma obrigação, tem-se a expectativa que os países signatários expressem o seu compromisso interno com a agenda de redução de emissões de metano como já fizeram EUA e União Europeia.



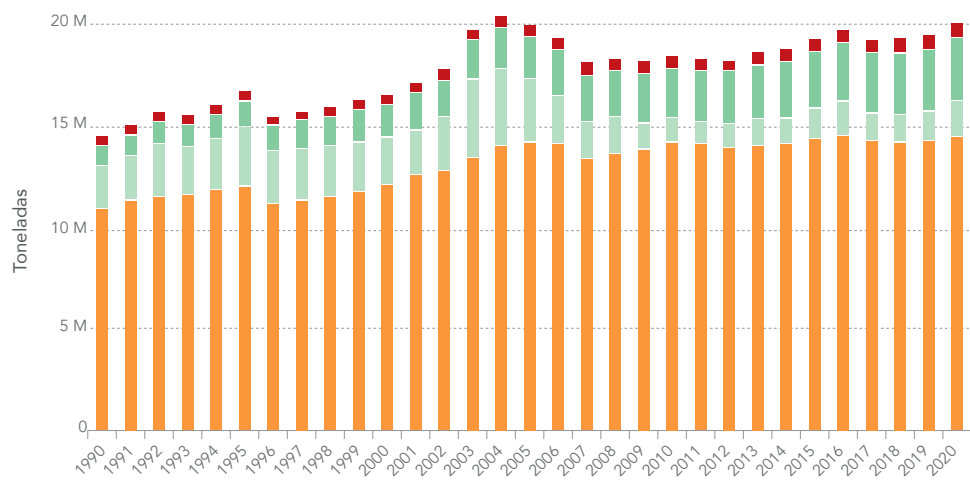
2 Panorama das emissões de metano

2.1. Emissões gerais

As emissões brasileiras de metano em 2020 foram estimadas pelo SEEG em 20,2 milhões de toneladas em 2020, o que corresponde a 565 MtCO₂e ou 26% das emissões totais de gases de efeito estufa do país.

Figura 9.
Emissões de Metano
no Brasil por Setor
(1990 – 2020)

- Agropecuária
- Mudança de uso de terra e Florestas
- Resíduos
- Energia



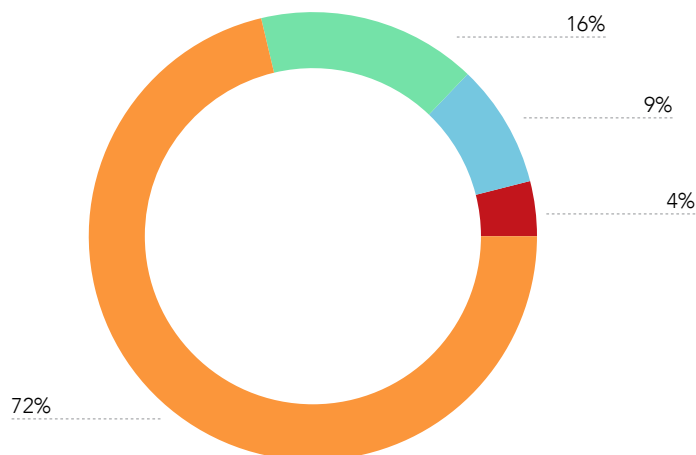
72%

das emissões de metano do Brasil vêm da agropecuária

Depois de um período de queda entre 2004 e 2008 as emissões de metano vêm subindo gradativamente. A principal fonte de metano no Brasil é a agropecuária, com 71,8% das emissões (com destaque para a fermentação entérica, manejo de dejetos e produção de arroz irrigado), seguida do tratamento de resíduos, com 15,8%, e mudanças de uso da terra com 8,7%. Energia e processos industriais contribuem com 2,8% das emissões.

Figura 10.
Emissões de metano do Brasil

- Agropecuária
- Resíduos
- Mudança de uso de terra e Florestas
- Energia e Processos Industriais



2.2. Agropecuária

O setor agropecuário é o maior responsável pelas emissões de metano no país, tradicionalmente ocupando a posição de líder anual dessas emissões e no total acumulado já emitido. Em 2020, as emissões de metano totalizaram 14,54 milhões de toneladas (14,54 Mt CH₄), o equivalente a 71,8% das emissões nacionais do gás e um aumento de 1,4% em relação ao ano anterior. Foi a segunda maior emissão do setor, ficando somente atrás das emissões de 2016, ano em que foram emitidos 14,6 milhões de toneladas. A tendência histórica é de aumento, com pequenas oscilações anuais para cima e para baixo.

Dentro do setor, as fontes de emissão de metano são predominantemente provenientes da digestão realizada por animais ruminantes (fermentação entérica), seguida por tratamento e disposição dos dejetos gerados por esses animais (manejo de dejetos). Com uma participação bem menos expressiva, as demais emissões são provenientes do cultivo de arroz irrigado e pela queima dos resíduos agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar.

Resultante da atividade pecuária, o subsetor que mais contribuiu para as emissões de metano foi o de fermentação entérica, apresentando uma emissão total de 13,32 Mt CH₄ (91,6% das emissões do setor em 2020). Historicamente, a principal fonte de emissão desse subsetor é o rebanho da bovinocultura de corte, devido à digestão realizada pelos animais ruminantes, popularmente conhecida como o "aroto" do boi. Em 2020, o rebanho bovino brasileiro foi responsável pela emissão de 11,49 Mt CH₄, o maior valor da sua série histórica, com 86,3% das emissões dentro do subsetor de fermentação entérica. A segunda maior fonte emissora, o rebanho da bovinocultura de leite, emitiu 1,41 Mt CH₄ (10,6%). Assim, os rebanhos de bovinos de corte e leite, juntos, totalizaram 96,9% dessas emissões. Os demais animais ruminantes completam os 3,1% restantes, com uma emissão total de 0,41 Mt CH₄.

Ainda resultante da atividade de pecuária, o de manejo de dejetos animais foi o segundo maior emissor em 2020, também ocupando a mesma posição historicamente. Além da emissão de óxido nitroso (N₂O), um dos GEE mais impactantes, o subsetor tem como principal gás emitido o metano (CH₄), alcançando sua maior emissão em 2020, com o total de 0,85 Mt CH₄ e respondendo por 5,8% das emissões totais do setor de agropecuária. O rebanho de suínos é o destaque como principal fonte emissora, tendo emitido 0,39 Mt CH₄, o equivalente a 45,6% das emissões do subsetor. Logo em seguida aparecem os rebanhos de bovinos de gado de corte (31,0%) e gado de leite (17,2%). Destaca-se ainda a participação das emissões das aves, com 3,5% de participação, enquanto os demais rebanhos animais respondem pelos menos de 3% restantes.



As demais emissões de metano são referentes aos subsetores provenientes da atividade agrícola, que juntos responderam por 2,6% das emissões total do setor de agropecuária em 2020. O cultivo de arroz emitiu o total de 0,37 Mt CH₄ (2,5%), resultante da produção de arroz pelo sistema irrigado. Completando as emissões da atividade agrícola, a queima de resíduos agrícolas respondeu por 0,1% das emissões totais de metano, tendo como fontes de emissão a queima dos resíduos gerados pela cultura de cana-de-açúcar. Esta emitiu em 2020 aproximadamente 8 mil toneladas de metano.

A Figura 11 e a Tabela 1 trazem a evolução da emissão de metano na agropecuária e os valores das emissões por fonte de 1990 até 2020, respectivamente.

Figura 11. Evolução da emissão de metano na agropecuária e os valores das emissões por fonte de 1990 até 2020

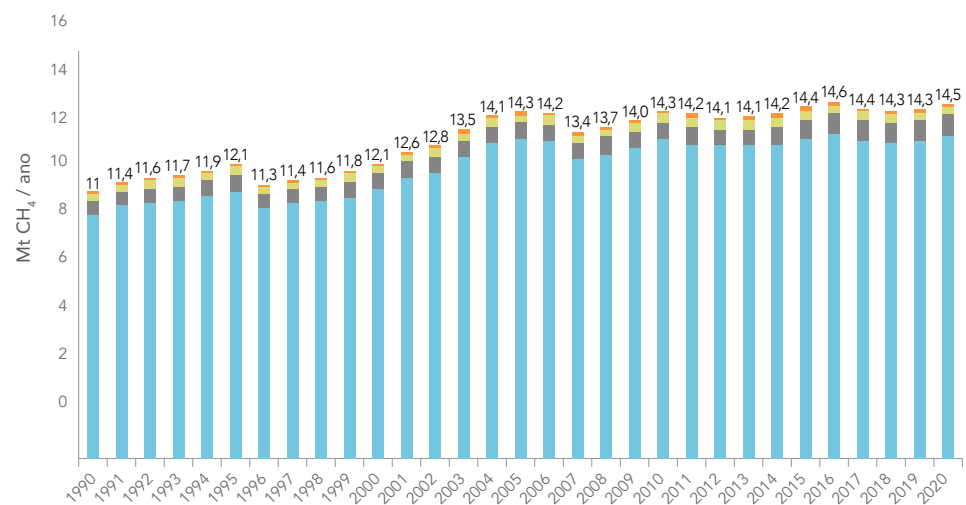
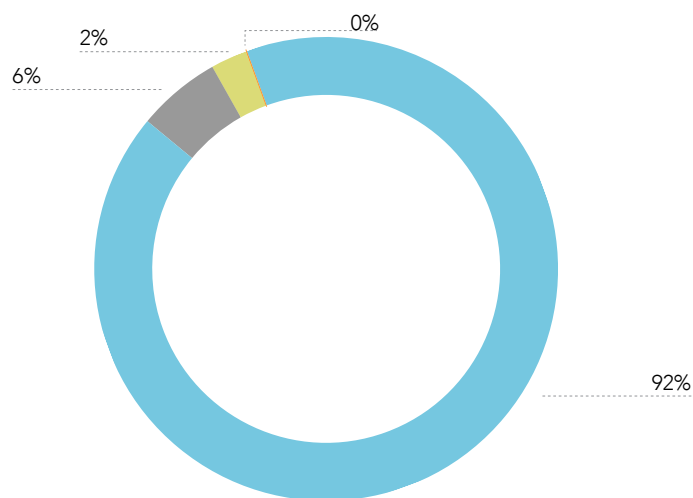


Figura 12. Evolução da emissão de metano na agropecuária e os valores das emissões por fonte de 1990 até 2020



- Fermentação Entérica
- Manejo de Dejetos Animais
- Cultivo de Arroz
- Queima de Resíduos Agrícolas



Tabela 1.

Emissões de metano
por subsetor e suas
respectivas fontes entre
o ano de 1990 e 2020

FONTES DE EMIÇÃO POR SUBSETOR	TONELADAS DE METANO POR ANO (tCH ₄ /ANO)							% DE PARTICIPAÇÃO
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2020
Fermentação Entérica	10.095.823	11.051.168	11.155.863	13.158.041	13.160.583	13.178.198	13.320.477	91,6%
Gado de Corte	7.917.610	8.718.622	9.155.918	10.941.913	10.771.054	10.947.751	11.496.964	86,3%
Gado de Leite	1.764.259	1.909.699	1.656.211	1.858.068	2.029.910	1.855.869	1.412.479	10,6%
Equino	110.187	115.095	104.973	104.170	99.257	99.923	107.318	0,8%
Ovino	100.073	91.682	73.925	77.940	86.903	92.053	103.143	0,8%
Bubalino	76.840	90.307	60.640	64.550	65.148	75.377	82.637	0,6%
Caprino	59.473	56.358	46.734	51.534	46.564	48.104	60.506	0,5%
Suínos	33.623	36.062	31.562	34.064	38.957	39.795	41.124	0,3%
Muar	20.329	19.901	13.479	13.887	12.774	11.667	10.749	0,1%
Asinino	13.428	13.442	12.422	11.915	10.016	7.660	5.556	0,0%
Manejo de Dejetos Animais	540.848	602.294	571.046	664.364	715.213	818.880	845.146	5,8%
Suínos	268.085	294.486	241.520	264.848	289.282	370.819	385.390	45,6%
Gado de Corte	175.656	195.473	207.182	249.333	243.925	248.647	262.244	31,0%
Gado de Leite	62.623	73.627	85.032	109.192	136.724	151.924	145.192	17,2%
Aves	10.974	14.649	16.970	20.118	25.038	26.908	29.918	3,5%
Equino	11.355	11.892	10.805	10.815	10.390	10.497	11.373	1,3%
Ovino	3.403	3.123	2.634	2.834	3.157	3.370	3.874	0,5%
Bubalino	2.424	2.870	1.912	2.038	2.073	2.426	2.672	0,3%
Caprino	2.569	2.434	2.034	2.239	2.016	2.090	2.642	0,3%
Muar	2.165	2.144	1.484	1.537	1.422	1.294	1.189	0,1%
Asinino	1.593	1.594	1.474	1.412	1.186	904	653	0,1%
Cultivo de Arroz	331.173	412.032	368.254	385.583	385.492	425.361	370.341	2,5%
Arroz	331.173	412.032	368.254	385.583	385.492	425.361	370.341	100,0%
Queima de Resíduos Agrícolas	40.430	42.389	37.471	48.662	42.927	13.728	7.723	0,1%
Cana-de-açúcar	36.663	42.389	37.471	48.662	42.927	13.728	7.723	100,0%
Algodão	3.767	0	0	0	0	0	0	0,0%
Total Geral	11.008.274	12.107.883	12.132.635	14.256.650	14.304.216	14.436.167	14.543.687	100,0%



Ao analisar as emissões totais por fonte, há o predomínio das fontes animais, principalmente o gado de corte (11,76 Mt CH₄) e de leite (1,56 Mt CH₄), totalizando em 2020 a emissão de 13,32 Mt CH₄, o que corresponde a 91,6% das emissões totais de metano na agropecuária.

Até mesmo as demais fontes da agropecuária ficam bem distantes em relação à produção de bovinos, como visto na terceira fonte mais emissora do setor, os suínos, com a emissão total de 0,43 Mt CH₄ e o total de participação de 2,9%. A quarta fonte é a emissão de origem agrícola, sendo o arroz irrigado responsável por 2,5% das emissões, com 0,37 Mt CH₄. As demais fontes representam 3%.

Desde 1990, as emissões de metano do setor agropecuário aumentaram 32,1%, impulsionadas pela ampliação da população de bovinos no país. De 1990 até 2020, o rebanho bovino cresceu 48,3%, passando de 147,1 milhões para 218,2 milhões de cabeças (IBGE, 2022a). Para o mesmo período, as emissões totais de metano desse rebanho tiveram aumento de 34,2%, saindo de 9,92 Mt CH₄ para 13,32 Mt CH₄. A diferença entre os percentuais indica que, apesar do aumento das emissões pelo crescimento do rebanho, houve ganho de eficiência no setor.

A partir das fontes de emissão reportadas, a emissão média por cabeça de gado de corte no país vem diminuindo, partindo de 63,2 kg CH₄ em 1990 e alcançando 58,2 kg CH₄ em 2020. Já para o gado de leite a emissão média por cabeça oscilou entre 95,8 kg CH₄ e 96,3 kg CH₄ para o mesmo período. Isso demonstra o potencial de redução na intensidade das emissões que o setor pode explorar ainda mais por meio da adoção, manutenção e expansão de práticas e tecnologias que buscam reduzir as emissões de metano na pecuária bovina, conciliando a busca por maior produtividade para a cadeia da carne e leite.

Em 2020, a emissão da carcaça de boi produzida foi de 1,50 kg CH₄/kg carcaça, 37,5% menor do que em 2000, ano em que a emissão foi de 2,40 kg CH₄/kg carcaça. Para o mesmo período, a produção de leite foi recorde, com 35,4 bilhões de litros, resultando em uma intensidade de emissão de 0,04 kg CH₄/litro de leite, menos da metade da de 2000, com 0,09 kg CH₄/litro de leite e uma produção de leite 44,2% menor que 2020.

Da atividade agrícola, o arroz cultivado em sistema irrigado é a fonte mais emissora. De 1990 até 2020, a emissão de metano teve aumento de 11,8%, saindo de 0,33 Mt CH₄ para 0,37 Mt CH₄. Nota-se essa relação ao ver, paralelamente, o aumento de 18,1% área cultivada para o mesmo período, partindo de 1,1 milhão de hectares em 1990, para 1,3 milhão de hectares em 2020, mesmo com a tendência de redução da área total no país nos últimos anos, tendo ano de 2011 a área máxima até então, de 1,51 milhão de hectares. Em contrapartida ao aumento das emissões, a produtividade vem crescendo ao longo do tempo, com maior eficiência, passando de 4,6 toneladas por hectare em 1990, para 7,8 toneladas por hectare em 2020, ou seja, aumento de 70,2% na produtividade (Embrapa Arroz e Feijão, 2022).

Em relação à queima dos resíduos da cana-de-açúcar, fica evidente o impacto positivo na redução das emissões por regulamentações e ações de boas práticas para o manejo e colheita, como o Decreto Federal N° 2.661/1998, que prevê a redução gradativa do emprego do fogo como forma de manejo da cana-de-açúcar. Também houve iniciativas no nível estadual, como no Estado de São Paulo, o maior produtor de cana e com maior área. Em relação ao algodão herbáceo, a queima

12%

foi o aumento da emissão de metano por produção de arroz desde 1990



dos seus resíduos deixou de ocorrer ainda na década de 1990, sendo eliminada já em 1995, resultante do processo de mecanização total do setor e do uso de defensivos agrícolas como meio de eliminação dos resíduos gerados (MCTI, 2020d).

Assim, de 1990 até 2020, as emissões pela queima dos resíduos de cana-de-açúcar e algodão tiveram a redução de 80,9%, partindo de 0,04 Mt CH₄ para aproximadamente 0,008 Mt CH₄. Ao mesmo tempo, a produção de algodão foi recorde em 2020, alcançan-

do 7,1 milhões de toneladas, uma produção de quatro vezes mais do que o setor apresentava em 1990. A cana-de-açúcar mais do que dobrou sua produção, passando de 4,3 milhões para 10 milhões de toneladas, aumento de 134,4%, enquanto sua área colhida quase triplicou, chegando em 757,1 milhões de hectares em 2020 (IBGE, 2022b).

A Figura 13 e a Tabela 2 trazem a evolução da emissão de metano pelas fontes da agropecuária e seus valores de emissões de 1990 até 2020, respectivamente.

Figura 13.
Evolução da emissão de metano pelas fontes da agropecuária e seus valores de emissões de 1990 até 2020

■ Gado de Corte
■ Gado de Leite
■ Suínos
■ Arroz
■ Demais fontes

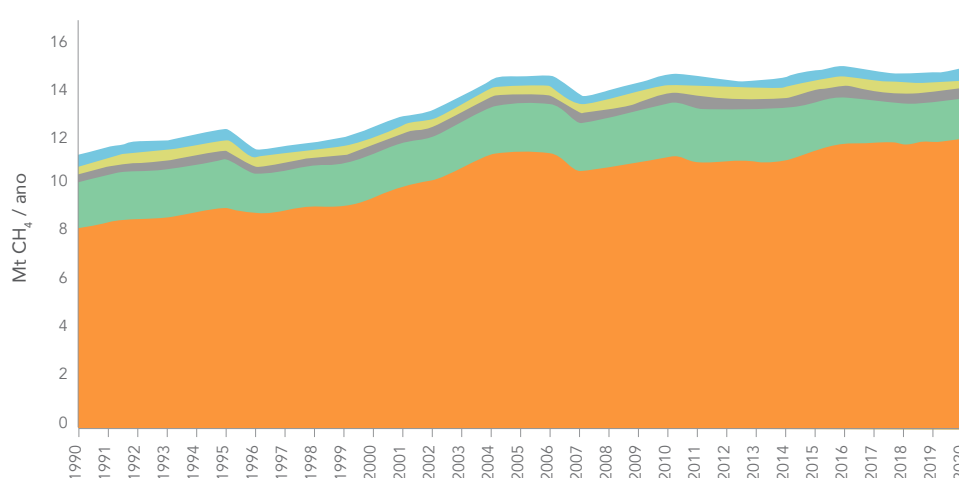


Tabela 2.

Emissões de metano (CH₄) por fontes entre o ano de 1990 e 2020

FONTES DE EMISSÃO	TONELADAS DE METANO POR ANO (tCH ₄ /ANO)							% DE PARTICIPAÇÃO 2020
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	
Gado de Corte	8.093.267	8.914.095	9.363.100	11.191.246	11.014.979	11.196.398	11.759.208	80,9%
Gado de Leite	1.826.882	1.983.326	1.741.243	1.967.259	2.166.634	2.007.793	1.557.671	10,7%
Suínos	301.708	330.548	273.082	298.912	328.239	410.615	426.514	2,9%
Arroz	331.173	412.032	368.254	385.583	385.492	425.361	370.341	2,5%
Equino	121.542	126.986	115.778	114.985	109.647	110.421	118.691	0,8%
Ovino	103.476	94.805	76.558	80.774	90.060	95.423	107.017	0,7%
Bubalino	79.265	93.178	62.552	66.587	67.221	77.803	85.309	0,6%
Caprino	62.042	58.793	48.768	53.773	48.580	50.194	63.148	0,4%
Aves	10.974	14.649	16.970	20.118	25.038	26.908	29.918	0,2%
Muar	22.494	22.045	14.963	15.423	14.196	12.961	11.937	0,1%
Cana-de-açúcar	36.663	42.389	37.471	48.662	42.927	13.728	7.723	0,1%
Asinino	15.021	15.036	13.895	13.327	11.202	8.564	6.209	0,0%
Algodão	3.767	0	0	0	0	0	0	0,0%
Total Geral	11.008.274	12.107.883	12.132.635	14.256.650	14.304.216	14.436.167	14.543.687	100,0%

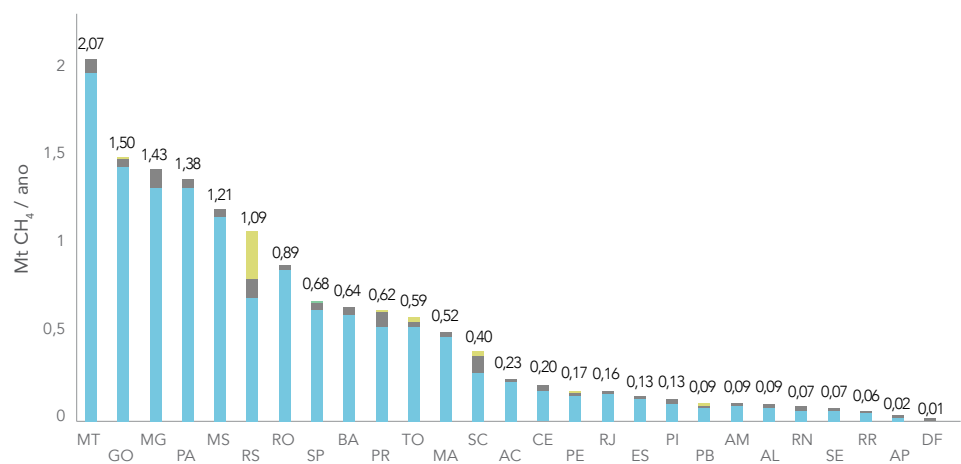


No nível estadual, a maior fonte de emissão é sempre a atividade pecuária. O maior emissor é Mato Grosso, com 2,07 Mt CH₄ em 2020, respondendo por 14,2% das emissões nacionais de agropecuária. Desde 2003 o Estado ocupa essa posição, justificada por apresentar o maior rebanho de bovinos, com mais de 32 milhões de cabeças em 2020. Logo em seguida, aparecem Goiás (10,3%) e Minas Gerais (9,8%), emitindo o total de 1,50 e 1,43 Mt CH₄, respectivamente. Somente esses três Estados juntos representaram mais de 34,4% das emissões.

Também se destacam Pará (9,5%), Mato Grosso do Sul (8,3%) e Rio Grande do Sul (7,5%), sendo que o cultivo de arroz irrigado é a segunda fonte mais emissora para este último, Estado com maior área colhida de arroz. A Figura 14 traz a emissão total de cada Estado em 2020.

Figura 14.
Ranking das emissões de metano estaduais do setor agropecuário em 2020

■ Fermentação Entérica
■ Manejo de Dejetos Animais
■ Cultivo de Arroz
■ Queima de Resíduos Agrícolas



2.3. Mudanças de uso da terra e florestas

ÁREAS ÚMIDAS

As emissões de metano em áreas úmidas no mundo são estimadas entre **55 e 150 milhões de toneladas (Mt)** por ano (Watson et al., 2000). No entanto, há grandes incertezas associadas e somente a compreensão dos ciclos naturais de metano em áreas úmidas permitirá a geração de melhores estimativas de emissões causadas por atividades antrópicas.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para entender a dinâmica natural das emissões de metano em áreas úmidas e as consequências antrópicas sobre essa dinâmica. No Brasil, esses estudos ocorrem principalmente na Amazônia, que é uma grande fonte global de metano, com importantes emissões advindas do solo inundável, de árvores de várzea (Pangala et al., 2017), mas também de árvores em terra firme (Gauci et al., 2021). No entanto, Basso et al. (2018) não identificaram alterações significativas nas emissões de metano para o período de 2010 a 2018, o que deixaria a Amazônia de fora dos principais suspeitos para o incremento observado a partir de 2007.



As incertezas relacionadas às emissões de metano em áreas úmidas são agravadas pela falta de concordância (em cerca de 30% dos totais globais estimados) entre métodos *top-down* de quantificação de emissões (e.g. imagens de satélite) e métodos *bottom-up* (quantificação local com mensurações de fluxo). Avanços metodológicos ainda são necessários para diminuir essas lacunas e determinar com mais precisão modelos de emissão em todas as escalas (Winton et al., 2017; Saunois et al., 2020). O mapeamento de áreas úmidas e inundáveis, assim como turfeiras, em altas resoluções e que capturem os diferentes tipos vegetacionais também são necessários para melhoria das estimativas (Saunois et al., 2020). De fato, áreas úmidas tropicais apresentam uma grande variação sazonal e regional nas assinaturas de CH₄ atmosférico, que devem ser melhor compreendidas para melhorar modelos globais e regionais, já que os estudos atualmente ainda são escassos (Winton et al., 2017; Teh et al., 2017; France et al., 2022).

A QUESTÃO DOS RESERVATÓRIOS

Os padrões e a dinâmica das emissões de metano em reservatórios artificiais são altamente variáveis e os resultados altamente dependentes do método utilizado para mensuração (Fearnside, 2016; Brandão et al., 2019). Alguns fatores são responsáveis pela variabilidade das emissões em reservatórios (Steinhurst et al., 2012), entre eles: temperatura, tempo de residência da água no reservatório, volume e profundidade da água, tipo de vegetação alagada, localização geográfica, idade desde o alagamento.

Mesmo considerando todos esses fatores, a maior parte dos fluxos mensurados de metano continuam altamente variáveis (Hertwich, 2013). Essas grandes variações temporais e espaciais desafiam a confiabilidade de fatores de emissão globais ou mesmo para regiões climáticas específicas. Dessa forma, as diretrizes mais atuais sugerem o estudo e a geração de fatores de emissão domésticos para os países que escolherem reportar suas emissões de metano (IPCC, 2019).

A única revisão dos estudos já realizados em usinas hidrelétricas tropicais de grande porte foi feita por Demarty e Bastien (2011), que incluiu dez usinas brasileiras. O estudo chama atenção para o fato de que não há um

consenso metodológico para estimar emissões em reservatórios, e que por isso a comparação entre as análises é repleta de incertezas. Na tabela abaixo, apresentamos os principais levantamentos feitos pelo estudo com relação às hidrelétricas no Brasil, além de incluir a usina de Petit Saut, na Guiana Francesa, por ser o mais longo e mais completo estudo em reservatório tropical já realizado (Abril et al., 2005; Tabela 3).

As emissões dos três compartimentos dentro do reservatório (por difusão, ebulição e degaseificação) devem ser consideradas (Demarty & Bastien, 2011). No entanto, apenas três estudos consideraram emissões por degaseificação: Fearnside et al. (2002) em Tucuruí (estimado, mas não diretamente mensurado), Kemenes et al. (2007) em Balbina e Abril et al. (2005) em Petit Saut. Para as demais usinas com densidades energéticas e emissões por difusão comparáveis com as emissões por difusão de Petit Saut e Balbina (Três Marias, Barra Bonita, Serra da Mesa e Samuel), as emissões por degaseificação foram estimadas por Demarty e Bastien (2011) considerando as proporções obtidas nesses estudos sobre o total de emissões por difusão mensurados.



Tabela 3.

Características das usinas hidrelétricas e seus reservatórios levantadas pelo estudo de Demarty e Bastien (2011), incluindo as usinas no Brasil e a Petit Saut, na Guiana Francesa. Em negrito estão os reservatórios cujos estudos consideraram emissões por degaseificação nos seus cálculos e estimativas. Em itálico, os reservatórios com densidade energética e emissões por difusão comparáveis aos estudos mais completos (Balbina e Petit Saut), para os quais os autores aplicaram a proporção “emissões por degaseificação/emissões por difusão” obtidas em Balbina e Petit Saut.

USINA	ANO	IDADE NO MOMENTO DO ESTUDO	RIO/ESTADO	ÁREA (km ²)	VOLUME (m ³)	EMISSÕES ANUAIS DE CH ₄	DENSIDADE ENERGÉTICA (MW/km)	FATOR DE EMISSÃO (Kg CO ₂ e/MWh)*
<i>Três Marias</i>	1962	36	<i>São Francisco (MG)</i>	1155	1.42x10 ⁷	74508	0.34	875,56
<i>Barra Bonita</i>	1963	35	<i>Tietê (SP)</i>	334.31	2x10 ⁵	2379	0.42	422,12
Tucuruí	1984	5	Tocantins (PA)	2875	6.04x10⁶	97001	2.91	115,37
<i>Samuel</i>	1987	11	<i>Jamari (RO)</i>	560	3.48x10 ⁵	21224	0.39	560,88
Balbina	1989	16	Uatuma (AM)	2360	3.88x10⁵	97000	0.11	2222,00
<i>Itaipu</i>	1991	7	<i>Paraná (PR)</i>	1350	1x10 ⁷	5880	9.33	1,51
<i>Segredo</i>	1992	6	<i>Iguaçu (PR)</i>	82	NA	263	15.37	1,21
<i>Xingó</i>	1994	4	<i>São Francisco (SE)</i>	60	1.32x10 ⁷	878	50	1,13
<i>Miranda</i>	1998	1	<i>Araguari (MG)</i>	70	NA	2847	5.83	45,42
<i>Serra da Mesa</i>	1998	1	<i>Tocantins (GO)</i>	1784	NA	16637	0.71	61,57
Petit Saut	1994	10	Sinnamary (Guiana Francesa)	310	4.5x10⁵	11427	0.37	510,50

*Emissões em CO₂e adaptadas do artigo e calculadas considerando apenas as emissões em CH₄

Nota-se que os fatores de emissão resultantes do estudo são altamente variáveis, de 61,57 a 2.222 Kg CO₂e/MWh. A utilização desses fatores com base na energia gerada (MWh) em reservatórios de UHEs geraria valores com discrepância da ordem de até 40 vezes entre os mais e os menos conservadores. Por essa razão, e devido à alta incerteza associada desses estudos, apresentamos nesse documento o exercício proposto pelo IPCC no nível de Tier 1 (descrito abaixo), de forma que reportamos valores mais conservadores de emissões de metano por reservatórios de usinas hidrelétricas.

DIRETRIZES DO IPCC

As diretrizes de *Wetlands* do IPCC (2006), que englobam tanto áreas úmidas naturais quanto reservatórios, traziam fatores *default* no Tier 1, gerados através da obtenção da mediana das

estimativas obtidas em uma revisão da literatura. Esses fatores medianos, usados para excluir dados extremos altos de emissão estimados, são criticados por Fearnside (2015), que indica que a média seria mais adequada para capturar a realidade dessas emissões, além de criticar a revisão realizada, que excluía boa parte dos estudos realizados em regiões tropicais. De qualquer forma, o IPCC (2006) ainda faz a ressalva de que a variabilidade das estimativas é extremamente alta em todos os processos considerados (difusão, ebulição e degaseificação) e a adoção de fatores de emissão *default* vai resultar em um alto grau de incerteza.

O refinamento das diretrizes, em 2019, trouxe a novidade de fatores específicos para regiões macroclimáticas, mas ainda utiliza a mediana das estimativas e indica emissões apenas por difusão no Tier 1, sendo que o



dado de atividade necessário para o cálculo é a área de superfície do reservatório. No Tier 2, o IPCC atualmente sugere a adoção de emissões por ebulição específicas por país, e apenas no Tier 3, sugere a inclusão de emissões por degaseificação nas turbinas e a consideração de profundidade e idade do reservatório. O reporte das emissões em níveis mais detalhados (Tiers 2 e 3) continuam sendo opcionais, apesar de que as emissões por difusão a partir da superfície do reservatório são as mais conservadoras (Fearnside, 2013).

Por fim, nas novas diretrizes (IPCC, 2019), também é sugerido que os países calculem o indicativo do componente antrópico das emissões, que consideraria apenas a área alagada que não era corpo d'água ou área úmida natural não manejados antes do enchimento. Nesse caso, o mapeamento desses elementos é necessário.

Para o presente documento, fizemos o exercício de calcular as emissões em Tier 1 considerando a área dos reservatórios, obtida através do mapeamento realizado pela iniciativa MapBiomass e aplicando os fatores trazidos pelo IPCC (2019). As únicas considerações, no uso dos fatores, são classificar a região macroclimática do reservatório, que varia, na zona tropical, entre úmida e seca, baseada na precipitação anual acumulada de 1.000 mm; e a classificação da idade do reservatório (maior ou menor que 20 anos). O mapa de superfície de reservatório foi assim cruzado com as isoietas de precipitação acumulada média (CPRM/Serviço Geológico do Brasil) para definir a área total de reservatórios em zona tropical úmida e tropical seca. A tabela 4 apresenta as informações e o cálculo realizado por nós para esse exercício, que resulta em um total de emissões de CH₄ de 1,55 Mt/ano.

Tabela 4.

Cálculo das emissões de metano por reservatórios a nível Tier 1, baseado no método e nos fatores do IPCC (2019). O dado de atividade desse exercício é a área da superfície de reservatório em cada zona climática. Utilizamos para esse exercício o mapeamento da superfície dos reservatórios feito pela iniciativa MapBiomass Água, e classificamos a zona climática de cada reservatório de acordo com as isoietas de precipitação média acumulada anual no Brasil (CPRM/Serviço Geológico do Brasil)

IDADE DO RESERVATÓRIO	ÁREA (HECTARE)	FATOR DE EMISSÃO	EMISSÃO A JUSANTE DA TURBINA (PROPORÇÃO)*	ESTADO TRÓFICO*	ZONA CLIMÁTICA	EMISSÕES DE CH ₄ (Mt/ano)
< 20 anos	2.902.371	141,1	0,09	1	6 (tropical úmida)	0,45
< 20 anos	417.724	283,7	0,09	1	5 (tropical seca)	0,13
> 20 anos	2.902.371	251,6	0,09	1	6 (tropical úmida)	0,80
> 20 anos	417.724	392,3	0,09	1	5 (tropical seca)	0,18
Total						1,55

*Parâmetros com valores *default* para o Tier 1 do IPCC (2019).



QUEIMADAS

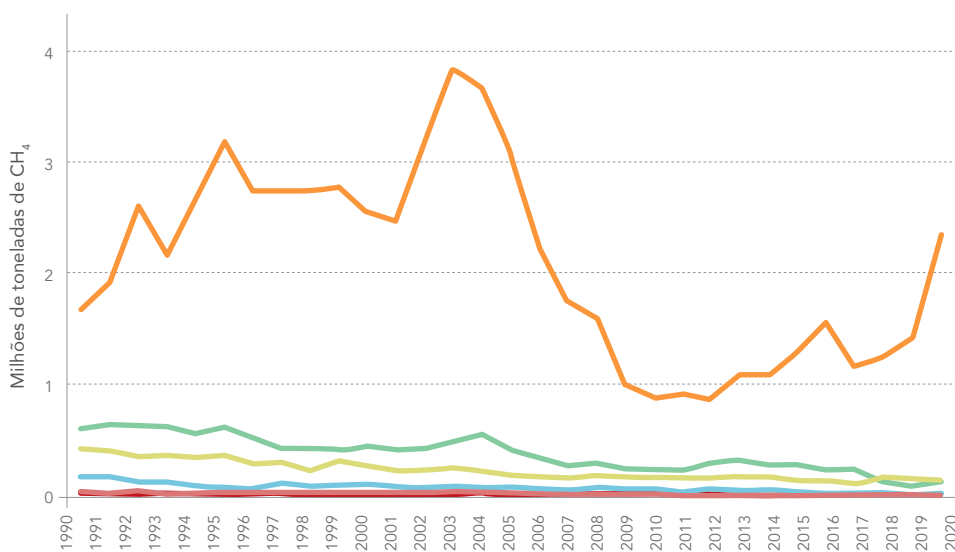
A emissão por queima da matéria orgânica é imediata e já existem fatores de emissão de metano relacionados a queimadas detalhados por tipo de vegetação. Esses fatores específicos são trazidos pelo IPCC (2006) e utilizados no Inventário Nacional (MCTI, 2020f).

Queimadas associadas ao desmatamento

As emissões associadas ao desmatamento são calculadas com base no método utilizado no Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020), onde das emissões provenientes das áreas desmatadas é retirada a biomassa de lenha e tora, obtida por estado (plataforma SIDRA/IBGE). A biomassa seca restante considera-se que é queimada, gerando emissões de metano e óxido nitroso. Esse cálculo já é contabilizado nas coleções do SEEG, e é identificado como "resíduos florestais". Em termos das emissões por queima de resíduos por desmatamento, a Amazônia sempre liderou os padrões de emissão de CH_4 , já que é ali que a maior parte do desmatamento ocorre no país, além de conter os maiores estoques de carbono (Fig. 15). Em 2020, o aumento vertiginoso do desmatamento na Amazônia foi acompanhado de maiores emissões por queima de resíduos florestais nesse bioma.

Figura 15.
Emissões de metano
por queima de
resíduos de vegetação
nativa em cada
bioma brasileiro
entre 1990 e 2020.

Amazônia
Caatinga
Cerrado
Mata Atlântica
Pantanal
Pampa



Queimadas não associadas ao desmatamento

Iniciativas que trazem o mapeamento de áreas queimadas/cicatrizes de fogo permitem o detalhamento dessas emissões. Esse mapeamento é normalmente feito com o uso de imagens de satélite (produtos específicos do Modis ou índices espectrais de satélites ópticos). A iniciativa MapBiomas Fogo tem como objetivo a geração de uma série temporal de área queimada para o Brasil em uma resolução de 30 m desde 1985, o que representa a possibilidade da geração de estimativas de emissões de metano por fogo em alto nível de detalhe (MapBiomas Fogo, disponível em <https://mapbiomas.org/>).



Para o presente cálculo, consideramos todas as cicatrizes anuais geradas pelo MapBiomas Fogo em áreas naturais (florestais, savânicas, campestres e áreas úmidas) e antrópicas (pastagem e áreas agrícolas). No caso da pastagem, é uma prática comum a limpeza do terreno com fogo para renovação do pasto, e essa classe apresenta a maior proporção de área queimada média anual (Tabela 5, Figura 16). Uma precaução foi tomada para evitar a recontagem das áreas antrópicas queimadas logo após o desmatamento: a área de desmatamento anual gerada pelo setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas no método do SEEG foi descontada das cicatrizes anuais de fogo, de forma que apenas as queimadas em pastagem e agricultura não associadas ao processo de desmatamento foram contabilizadas.

A Quarta Comunicação Nacional traz fatores de combustão apenas para classes nativas, mas buscamos fatores de emissão e combustão de áreas de pastagem e agricultura do IPCC (2006). Para o exercício de queimadas não associadas ao desmatamento em florestas da Amazônia, foi considerada a frequência de fogo, pois esse bioma é altamente sensível ao fogo e sofre um incremento na mortalidade de árvores em áreas queimadas repetidas vezes. Dessa forma, o mapa de estoque de carbono em necromassa (material combustível) nas florestas é atualizado a cada evento de queima. Esse método já foi calculado no SEEG 9, e é reportado como emissões NCI (não contabilizadas no inventário).

No total, calculamos as emissões pela queima de 531.810.842 ha acumulados em todo o período, em áreas de vegetação nativa (floresta, savana, campo e áreas úmidas) e áreas antrópicas (pastagem e agricultura). Anualmente, no Brasil, as classes com maior área queimada são a formação savânica e a pastagem (Figura 13). No total acumulado no período, no entanto, as queimadas em pastagem despontam com quase um terço de todas as queimadas contabilizadas (Tabela 5). Somadas, no entanto, as áreas nativas representam 65% de toda a área queimada no país no período analisado, contra 35% de áreas antrópicas, dos quais a maior parte (92%) é de pastagem. Ressaltamos, porém, que as emissões não são diretamente proporcionais às áreas de queima, pois os estoques de combustível assim como os fatores de combustão variam de acordo com o tipo de vegetação.

65%

de toda a área
queimada no país
desde 1985 foi de
vegetação nativa

Tabela 5.

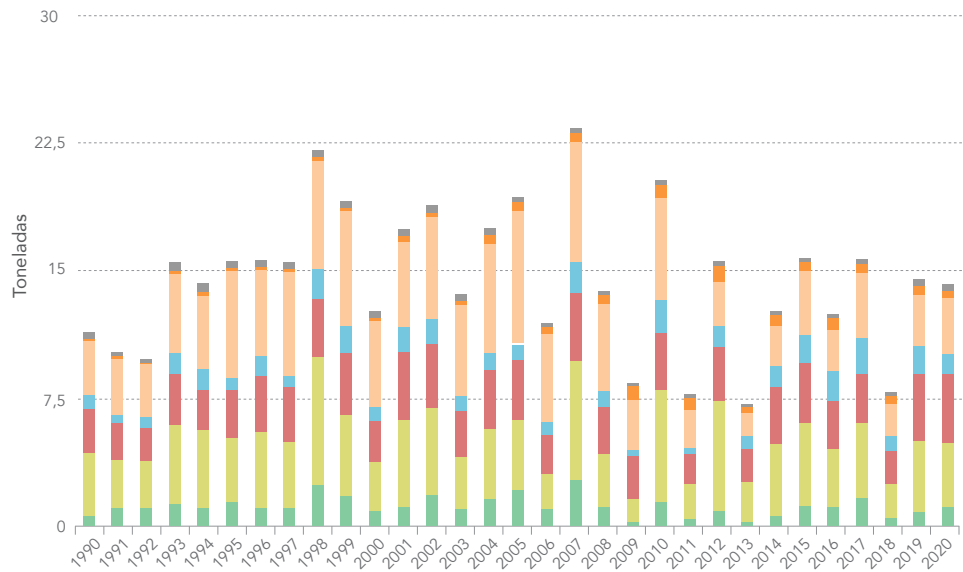
Áreas queimadas consideradas e não consideradas no presente exercício, para as queimadas não associadas ao desmatamento, obtidas na plataforma da iniciativa MapBiomas Fogo (<https://mapbiomas.org/>), assim como os fatores de emissão e combustão associados a cada classe, de acordo com o MCTI (2020f) e o IPCC (2006)

CLASSE MAPBIOMAS	ÁREA QUEIMADA ACUMULADA (HECTARE)	ÁREA QUEIMADA MÉDIA POR ANO (HECTARE)	PROPORÇÃO DA ÁREA QUEIMADA	CONSIDERADA NO CÁLCULO?
Floresta	43.952.083	1.220.891	8,24%	sim
Savana	153.107.093	4.252.975	28,70%	sim
Campo	108.332.093	3.009.225	20,31%	sim
Áreas úmidas	42.453.187	1.179.255	7,96%	sim
Pastagem	169.328.738	4.703.576	31,74%	sim
Agricultura	14.637.648	406.601	2,74%	sim
Outras classes	1.634.097	45.392	0,31%	não



Figura 16. Área queimada no Brasil em cada classe entre 1990 e 2020, segundo o MapBiomos Fogo

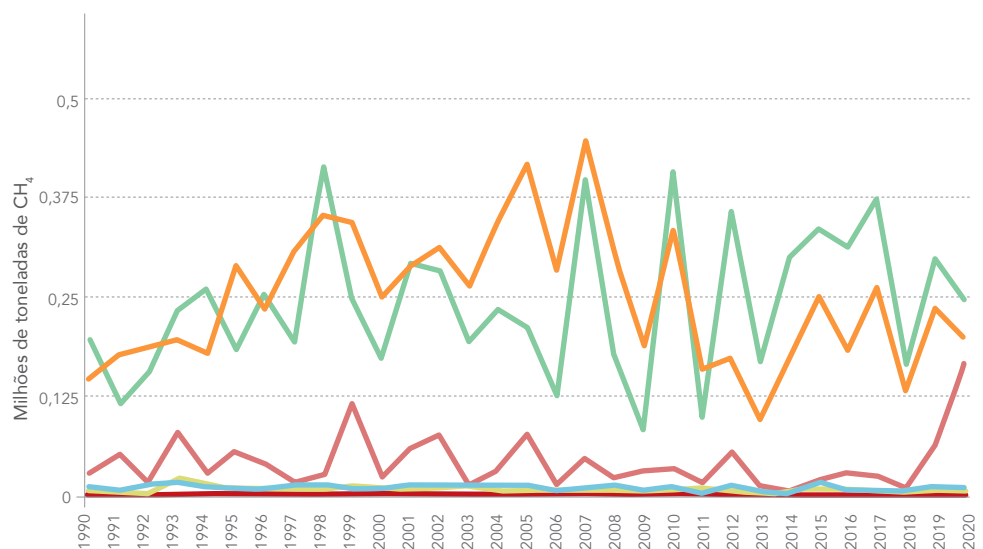
- Formação florestal
- Formação savânica
- Formação campestre
- Áreas úmidas
- Pastagem
- Agricultura
- Outros



As emissões por queimadas não associadas ao desmatamento se dão principalmente em áreas nativas, que são em média responsáveis por 87% do número de focos de queimadas anuais no país (Tabela 5). Os biomas Amazônia e Cerrado representam os biomas que mais queimam, mas um salto significativo foi observado no Pantanal em 2020, momento em que quase alcançou as emissões da Amazônia (Figura 17).

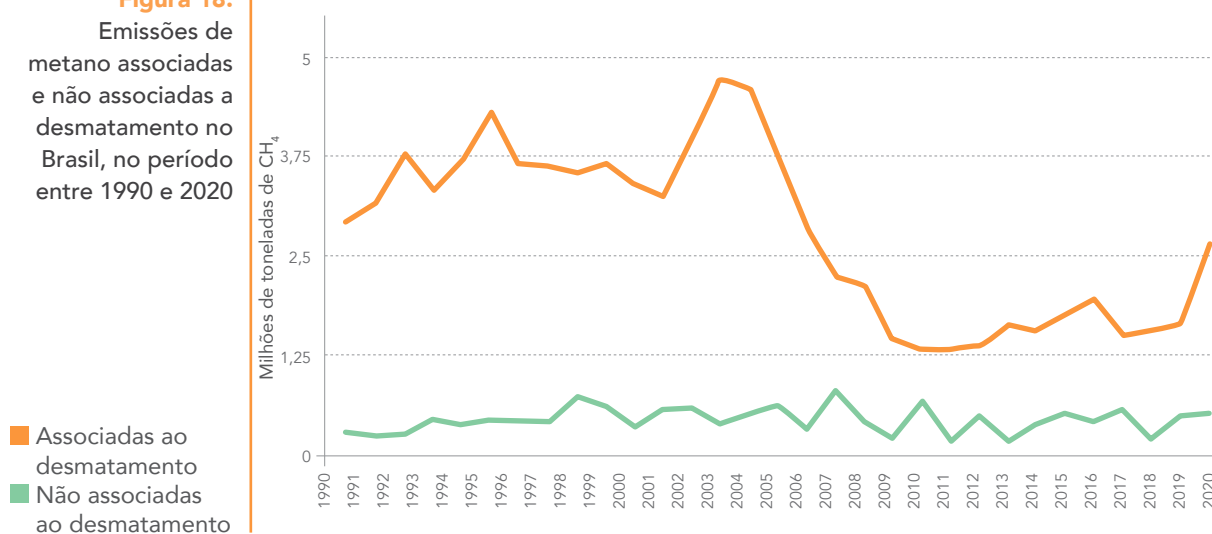
Figura 17. Emissões de metano por queima em vegetação nativa (formação florestal, savânica, campestre e áreas úmidas) e em classes de uso antrópico (pastagem e área agrícola) em cada bioma brasileiro no período de 1990 a 2020, de acordo com a área queimada classificada pela iniciativa MapBiomos Fogo.

- Amazônia
- Caatinga
- Cerrado
- Mata Atlântica
- Pantanal
- Pampa



No geral, as emissões por queimadas associadas ao desmatamento ultrapassam as emissões não associadas ao desmatamento (Figura 18), mesmo considerando que as áreas queimadas são maiores do que as áreas desmatadas a cada ano. Isso se dá porque a biomassa que queima em áreas naturais é sempre a necromassa, que está disponível como combustível no momento em que o fogo passa. Já nas áreas recém desmatadas, todo o estoque presente é queimado, com a exceção de uma parte em lenha e madeira em tora retiradas previamente. Essa diferença explica o maior efeito das queimadas associadas ao desmatamento nas emissões de metano.

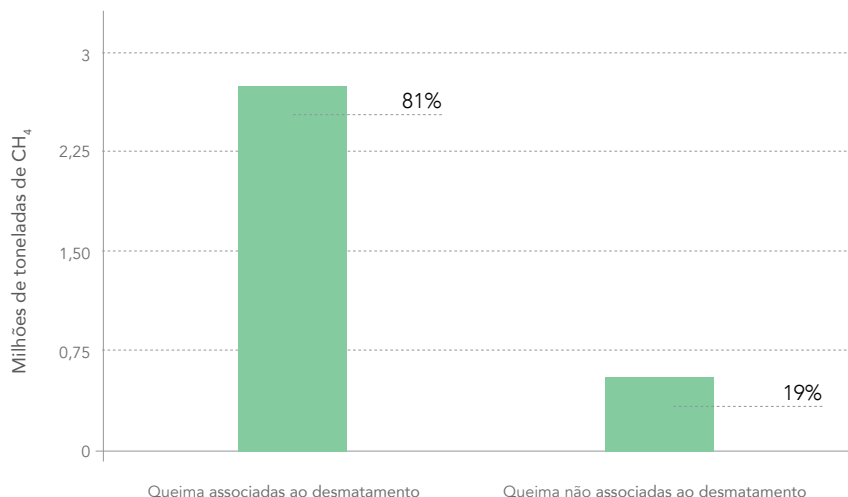
Figura 18.
Emissões de metano associadas e não associadas a desmatamento no Brasil, no período entre 1990 e 2020



PANORAMA GERAL SETOR MUT

De forma geral, para o ano de 2020, as emissões por queimadas associadas ao desmatamento representam a maioria (81%) das emissões contabilizadas com 2,71 milhões de toneladas de CH₄. As queimadas não associadas ao desmatamento emitiram 620 mil toneladas de CH₄ (19%) (Figura 19).

Figura 19.
Perfil de emissões de metano estimadas para o ano de 2020 no setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas, com relação à queima de resíduos associados ao desmatamento e à queimadas não associadas ao desmatamento no Brasil



2.4. Tratamento de resíduos

Em 2020, as emissões de metano totalizaram 3,17 milhões de toneladas (3,17 Mt CH₄), um aumento de 1,8% em relação ao ano anterior. O setor de resíduos apresenta um perfil crescimento contínuo em sua série histórica: em 1990 as emissões foram de 0,95 milhões de toneladas de CH₄, chegando a 2,47 milhões de toneladas em 2010 e 3,17 milhões de toneladas em 2020.

O setor foi responsável por 15,8% das emissões nacionais de CH₄, apresentando como fonte de emissão predominante a disposição final de resíduos sólidos municipais, que contabilizaram 2,11 Mt (milhões de toneladas) de CH₄, seguida das emissões de tratamento de efluentes líquidos domésticos, que contabilizaram 0,82 Mt CH₄, como pode ser observado na Tabela 6 e Figura 20.

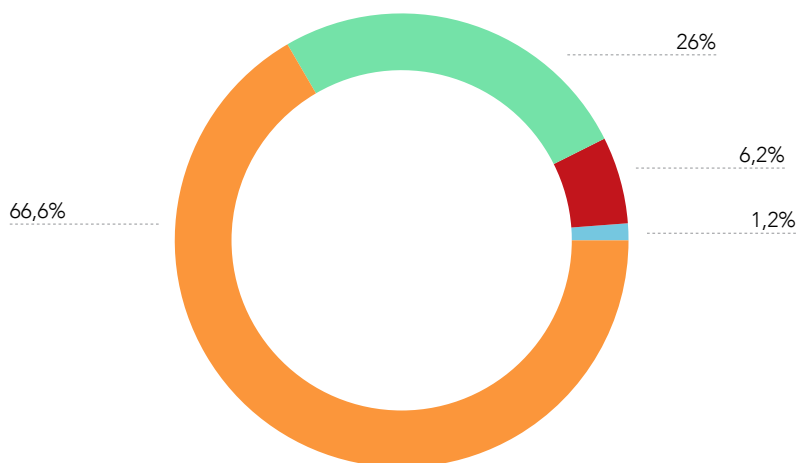
Tabela 6. Emissão de metano por tipo de tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos em 2020

SUBSETOR	tCH ₄ EM 2020	CONTRIBUIÇÃO (%)
Disposição Final de Resíduos Sólidos	2.114.384	66,6
Incineração ou queima a céu aberto	38.091	1,2
Tratamento Biológico de Resíduos Sólidos	1.252	0,04
Efluentes Líquidos Domésticos	825.072	25,99
Efluentes Líquidos Industriais	196.019	6,17
TOTAL	3.174.817	100,00

Fonte: Dados SEEG, 2021

Figura 20.
Contribuição nas emissões de metano por subsetor no tratamento de resíduos

- Disposição final de resíduos sólidos
- Efluentes líquidos domésticos
- Efluentes líquidos industriais
- Incineração ou queima a céu aberto

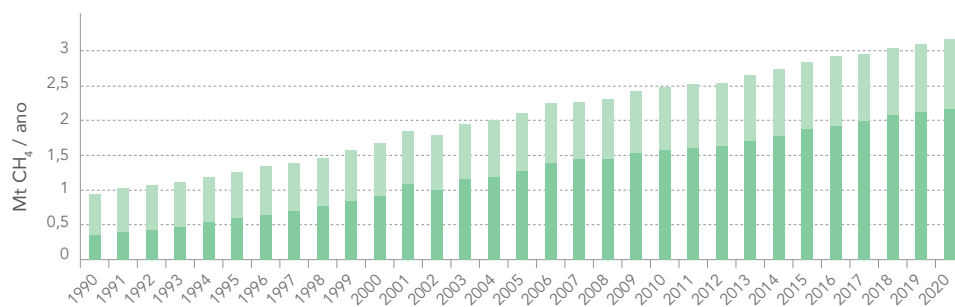


Historicamente, as emissões do setor são marcadas pelo crescimento acentuado, com discreta estabilização nos últimos anos. Esse comportamento está principalmente relacionado com o aumento da população e, conseqüentemente, da quantidade de resíduos gerada, bem como ao avanço no acesso aos serviços de saneamento, conforme pode ser observado na figura abaixo.



Figura 21.
Perfil de emissões de metano no tratamento de resíduos para o período de 1990 a 2020

■ Resíduos sólidos
■ Tratamento de efluentes líquidos



A Tabela 7 descreve as emissões de CH₄ por atividade de fonte de emissão no setor de resíduos no período de 1990 a 2020. Nota-se que, no início da série histórica, as emissões de metano eram oriundas principalmente do tratamento de efluentes domésticos. No decorrer dos anos, com o avanço da implementação de aterros e aumento nas taxas de coleta de resíduos sólidos, a

disposição final passou a se destacar. Atualmente, os aterros sanitários, em especial os localizados em regiões metropolitanas e que recebem uma grande quantidade de resíduos, são os principais contribuintes para as emissões de metano no setor. A Figura 22 traz a evolução da emissão de metano por fonte para o setor de resíduos de 1990 até 2020, respectivamente.

Tabela 7.

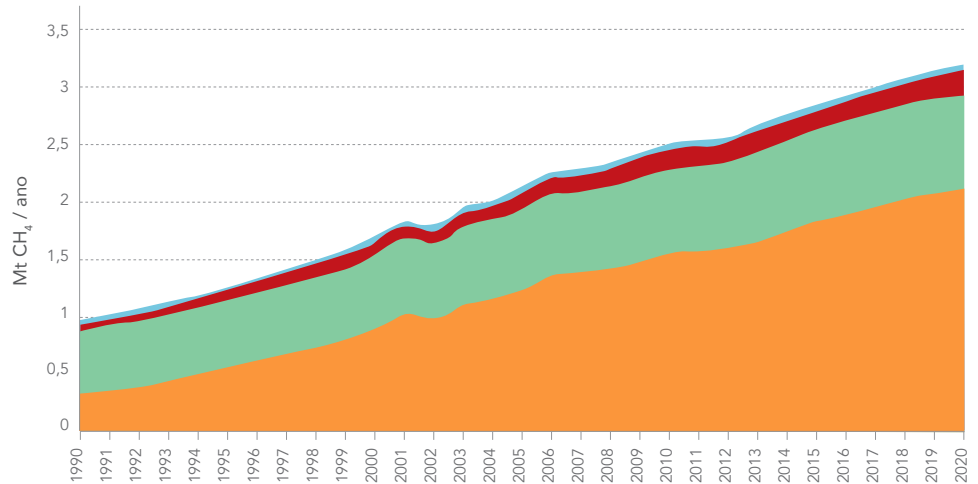
Detalhamento das emissões do setor de resíduos

FONTES DE EMISSÃO POR SETOR	TONELADAS DE METANO POR ANO (tCH ₄ /ANO)						
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Disposição Final de Resíduos Sólidos	331.987	544.465	878.655	1.235.791	1.544.809	1.831.450	2.114.384
Lodo de ETE	1.375	4.030	5.697	7.113	8.357	9.637	10.640
Resíduos de Serviços de Saúde	0	353	420	425	387	395	434
Resíduos Sólidos Municipais	330.613	540.083	872.538	1.228.253	1.536.065	1.821.419	2.103.310
Incineração ou queima a céu aberto	18.990	23.999	35.491	40.247	35.251	42.169	38.091
Emissões pela Queima de Resíduos a Céu Aberto	18.990	23.999	35.491	40.247	35.251	42.169	38.091
Tratamento Biológico de Resíduos Sólidos	1.165	1.937	3.040	540	206	1.133	1.252
Resíduos Sólidos Municipais	1.165	1.937	3.040	540	206	1.133	1.252
Efluentes Líquidos Domésticos	541.628	593.371	648.660	701.641	725.993	795.981	825.072
Esgoto Doméstico	541.628	593.371	648.660	701.641	725.993	795.981	825.072
Efluentes Líquidos Industriais	61.311	83.452	101.014	133.271	161.930	180.488	196.019
Produção de Carne Avícola	1.403	2.458	4.043	6.860	10.619	13.148	13.786
Produção de Carne Bovina	9.899	14.046	16.219	28.295	33.360	35.185	37.357
Produção de Carne Suína	2.590	4.454	5.593	9.711	14.954	16.678	21.749
Produção de Celulose	9.018	11.389	12.762	16.522	20.991	25.485	31.052
Produção de Cerveja	3.706	11.000	15.400	10.388	711	794	981
Produção de Leite Cru	27.099	33.401	43.100	57.400	76.401	86.000	88.149
Produção de Leite Pasteurizado	7.596	6.704	3.898	4.095	4.894	3.197	2.945
Total Geral	955.082	1.247.224	1.666.860	2.111.489	2.468.189	2.851.220	3.174.817



Figura 22.
Evolução das emissões do setor de resíduos por fonte

- Disposição final de resíduos sólidos
- Efluentes líquidos domésticos
- Efluentes líquidos industriais
- Incineração ou queima a céu aberto

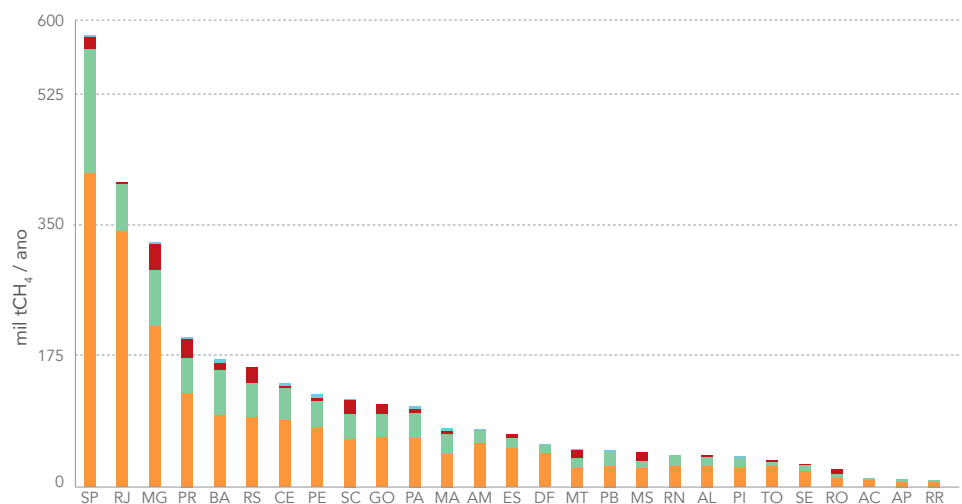


Assim como observado a nível nacional, nos Estados as principais fontes de metano também são a disposição final de resíduos sólidos e o tratamento de efluentes líquidos domésticos. No entanto, alguns Estados, como Minas Gerais, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso também apresentam contribuições significativas do subsetor de efluentes líquidos industriais, porque concentram atividades de produção de celulose, leite ou carnes.

No geral, os Estados que apresentam os maiores índices populacionais também são os que mais contribuem para as emissões de metano. Em 2020, o maior emissor foi o Estado de São Paulo, com a emissão de 603,14 mil toneladas de CH_4 , correspondendo a 19% das emissões do setor, seguido pelo Rio de Janeiro, com a emissão de 407,55 mil toneladas de CH_4 , correspondendo a 13% das emissões nacionais de resíduos, em 2020. Logo em seguida, aparecem Minas Gerais (10%) e Paraná (6%), contribuindo com um total de 328,04 e 201,35 mil toneladas de CH_4 , respectivamente. A Figura 23 traz a emissão total de cada Estado em 2020.

Figura 23.
Evolução das emissões do setor de resíduos por fonte

- Disposição final de resíduos sólidos
- Efluentes líquidos domésticos
- Efluentes líquidos industriais
- Incineração ou queima a céu aberto
- Tratamento biológico de resíduos sólidos

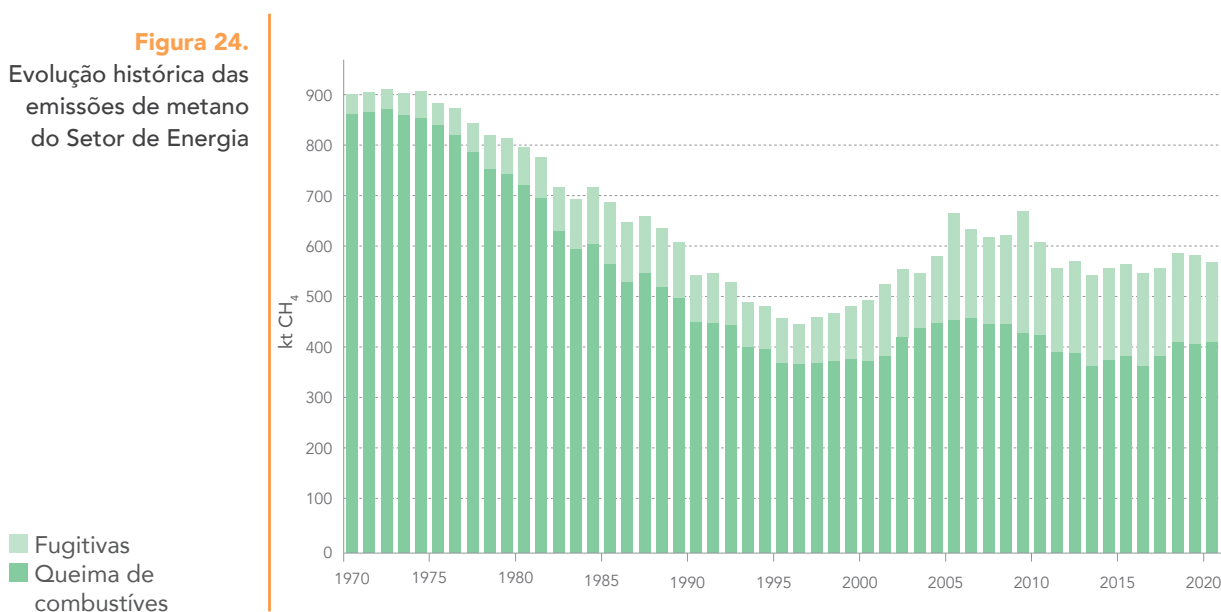


2.5. Energia

Estima-se que aproximadamente 572 mil toneladas de metano foram emitidas no setor de energia em 2020, correspondendo a 2,6% do total das emissões antrópicas do gás pelo Brasil no ano. Dessas emissões, 414 mil ocorreram pela queima de combustíveis e 158 mil foram emissões fugitivas (Figura 24).

Historicamente, dentre as emissões de metano do setor, que partem de um patamar próximo a 900 mil toneladas no início da década de 1970, predominaram as emissões pela queima de combustíveis, com queda desde 1970 até o meio da década de 1990 e relativa estabilidade desde então. Já as emissões fugitivas aumentaram gradualmente ao longo da série histórica até 2009, passando a decrescer desde então. Entre 1995 e 2000, observamos o período de menor emissões da série histórica, abaixo de 500 mil toneladas anuais.

Figura 24.
Evolução histórica das
emissões de metano
do Setor de Energia

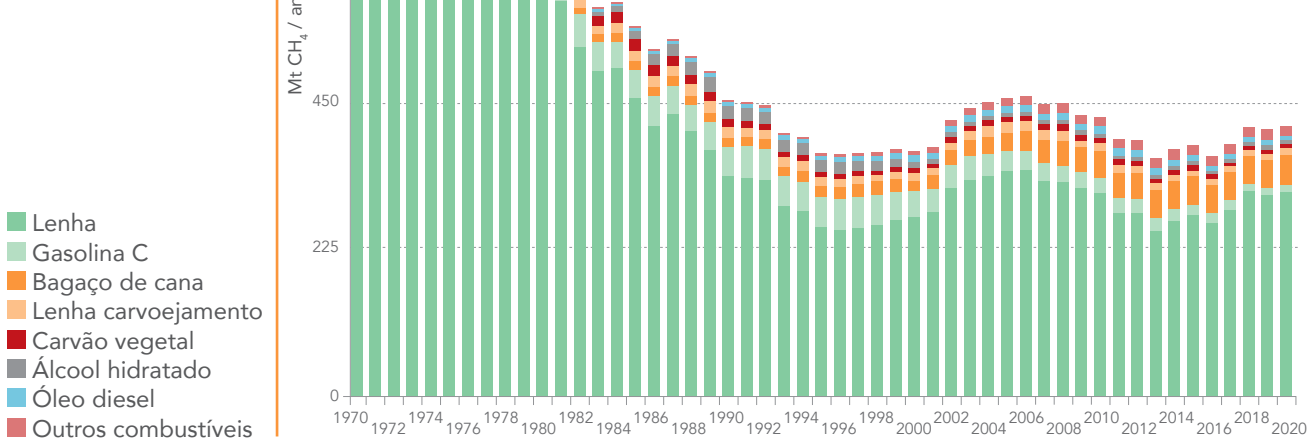


Detalhando-se mais, observamos que duas fontes emissoras majoritárias se destacam: a queima de lenha e a exploração e produção de petróleo e gás natural.

Nas queimas de combustíveis, a lenha é responsável pela grande maioria das emissões, vide Figura 25. Esse combustível foi e é usado principalmente em residências para cocção de alimentos, segundo os dados do Balanço Energético Nacional, sendo retrato da falta de acesso a outras fontes energéticas mais eficientes. Nas décadas de 1970 e 1980, tivemos uma grande redução no consumo de lenha com a disseminação do fogão a gás. Consequentemente, as emissões decaíram. Nos anos 1990, vemos a estagnação do consumo de lenha e das emissões de metano num patamar próximo à metade do que foi observado no início dos anos 1970.



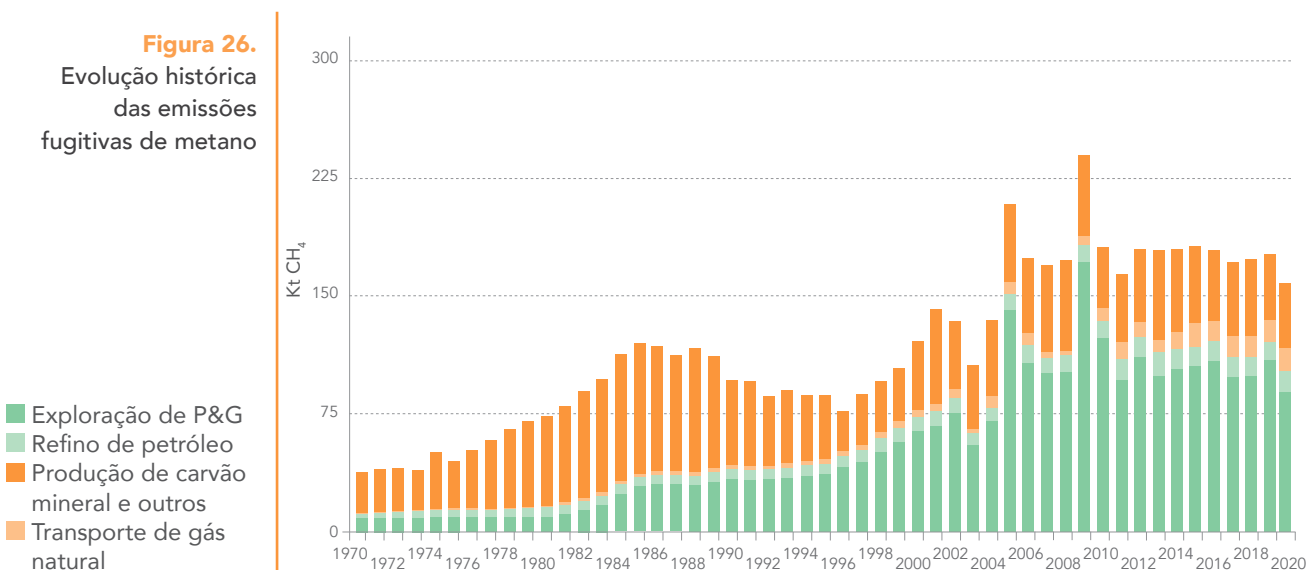
Figura 25.
Evolução histórica das emissões de metano pela queima de combustíveis



Dentre as emissões fugitivas, o destaque são as emissões da exploração de petróleo e gás natural, (Figura 26). Diferentemente das emissões pela queima de combustíveis, a dinâmica geral das emissões fugitivas foi de crescimento na série histórica. Antes da década de 1990, as emissões fugitivas eram predominantemente aquelas associadas à produção de carvão mineral. Nos anos 1980, as emissões de metano da produção desse combustível quase alcançaram as 100 mil toneladas anuais emitidas, mas, posteriormente, tiveram decréscimo, chegando a 2020 com 42 mil toneladas, fruto da diminuição da produção nacional do carvão.

Praticamente inexistente na década de 1970 e impulsionada pela descoberta do Pré-Sal na década de 2000, a exploração de petróleo e gás natural causou elevação nas emissões de metano até 2009 e, a partir de então, passou a oscilar em torno do patamar de 100 mil toneladas. Em 2020, as emissões encontraram-se no nível de 73 mil toneladas.

Figura 26.
Evolução histórica das emissões fugitivas de metano



Para este documento, foram revisadas as estimativas de metano com relação à última versão do SEEG (9ª edição), em que as emissões fugitivas da exploração de petróleo e gás foram calculadas a partir de fatores de emissão simplificados e extrapolados a partir dos dados de atividade, tomando-se como base as emissões publicadas até o 3º Inventário Nacional. A presente análise considera as emissões de metano reportadas no 4º Inventário Nacional, para o caso das emissões fugitivas associadas ao petróleo e ao gás natural.

2.6. Processos industriais e uso de produtos

0,22%

foi a participação do setor de PIUP no total nacional de emissões de metano em 2020

Em 2020 as emissões de metano do setor de Processos Industriais e Uso de Produtos (PIUP) foram estimadas em 44 mil toneladas, o que representou cerca de 0,22% do total das emissões de metano do Brasil no ano, segundo os dados da coleção 9 do SEEG. Assim, temos que as emissões de metano de PIUP são bastante menos significativas frente às outras fontes de emissão no país. Assim, neste documento, não são apresentadas análises ou propostas referentes às emissões de metano por PIUP.



3 Medidas para o Brasil reduzir as emissões

3.1. Agropecuária

A mitigação das emissões de metano no setor agropecuário compreende diferentes práticas de manejo e tecnologias. Entre os diversos benefícios de mitigar o metano destaca-se a grande oportunidade associada com o contínuo atendimento da demanda crescente por produtos agropecuários, direcionado pela busca do aumento da produtividade, junto com a promoção da adaptação dos sistemas produtivos diante os efeitos da emergência climática, contribuindo para atividades mais sustentáveis, de baixo carbono e contínuas de longo prazo.

Várias dessas práticas de manejo e tecnologias já são conhecidas e aplicáveis, sendo necessário cada vez mais que sua adoção, expansão e manutenção sejam estimulados para todos os modelos e escalas de produção. A seguir são apresentadas as principais rotas de mitigação de metano.

3.1.1 Tratamento de dejetos animais (TDA) da produção pecuária

O tratamento de dejetos animais (TDA) integra uma das etapas do manejo de dejetos animais, que abrange a coleta, armazenamento, tratamento e possíveis utilizações agrícolas dos subprodutos gerados. É uma estratégia de mitigação de metano, assim como de óxido nitroso, com a adoção de tecnologias e sistemas que reduzem a conversão da matéria orgânica em metano, como a biodigestão e a compostagem. Assim, viabilizam o tratamento e a destinação ambientalmente adequada dos dejetos dos animais (MCTI, 2020c).

A adoção e consolidação do emprego do TDA contribui para o saneamento e regularidade ambiental das propriedades rurais com atividade pecuária, com a maior proteção do solo e de corpos hídricos, além possibilitar ganhos econômicos com a possibilidade do aproveitamento energético e dos insumos orgânicos gerados pelos subprodutos das rotas de tratamentos utilizados, quando economicamente viáveis (Mapa, 2012).

A rota de tratamento via biodigestão consiste na decomposição da matéria orgânica por microrganismos presentes nos resíduos, através da digestão anaeróbia, gerando o biogás como um de seus produtos. É do biogás que se pode extrair o biometano, utilizado para o reaproveitamento energético com a geração de energia elétrica e calor, podendo também ser queimado caso não haja esse reaproveitamento (*flares*). Já o digestato, outro subproduto do biogás, pode ser utilizado na produção agrícola como biofertilizante, por conter nutrientes essenciais, como NPK. Assim, a redução da emissão de metano é garantida quando se realiza o tratamento dos dejetos substituindo o uso das tecnologias de lagoa anaeróbica e esterqueira, as mais comuns no país, por tecnologias como a biodigestão e a compostagem (Mapa, 2019, 2021).

Outra estratégia de mitigação de metano é pelo emprego da compostagem, técnica baseada no tratamento biológico através do controle da mistura entre os dejetos e matérias orgânicas adicionadas como fontes de carbono (maravalha, serragem e palha), sendo possível utilizar a biomassa resultante como insumo agrícola devido à elevada concentração de nutrientes. Assim é gerada uma biomassa com baixa emissão de metano, evitando as emissões que resultariam da decomposição anaeróbica dos dejetos caso fossem deixados sem tratamento e podendo ser um produto facilmente transportável pelas fazendas por estar em estado sólido (Mapa, 2019).

Em seu primeiro ciclo, o Plano ABC possuía como meta doméstica o incentivo à adoção e expansão do tratamento de dejetos animais, com o aproveitamento do biogás e compostos orgânicos gerados em seu processo. Para isso, foi previsto para o ano de 2020 o tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos animais, com o potencial de mitigar 6,9 Mt CO₂e (Mapa, 2012).

Em seu ciclo lançado em 2021, o novo Plano ABC+ reformulou TDA, que passou a se chamar de manejo de resíduos da produção animal (MRPA). Também incorporou demais resíduos provenientes da pecuária, resultante da criação animal. Exemplos desses resíduos são as misturas de água de limpeza, restos de alimentos, camas de resíduos da avicultura, restos de carcaças e de animais mortos, resíduos fisiológicos e demais resíduos que demandam tratamento prévio. Além disso, o MRPA continua a fomentar o uso dos subprodutos obtidos desses processos de tratamento, como a bioenergia e os biofertilizantes.

Assim, a meta é que até 2030 o MRPA seja responsável pelo tratamento de 208,4 milhões de m³ de resíduos de origem animal, com o potencial de mitigação de 277,80 Mt CO₂e. Esse volume esperado parte da premissa que 27% do total dos resíduos gerados pelos sistemas de produção animal serão tratados via biodigestão e compostagem (Mapa, 2021).

Seguindo a metodologia adotada pelo Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020c), pode-se obter a redução da emissão de metano na medida em que os sistemas de manejo de dejetos de animais empregados para as diferentes produções de animais sejam substituídos por outros sistemas mais eficientes. Assim, o potencial de mitigação está associado com a quantidade de dejetos tratados por sistemas que

resultam em uma menor emissão de metano, como o uso de biodigestores substituindo lagoas anaeróbicas ou o uso de compostagem no lugar do manejo de dejetos em armazenamento sólido.

3.1.2 Terminação intensiva (TI)

A terminação intensiva é uma das novas tecnologias incluídas no novo ciclo do Plano ABC+, buscando não somente a mitigação de emissões, principalmente as de metano, mas também contribuindo com a adaptação do sistema produtivo animal, por um uso mais eficiente das pastagens.

A mitigação promovida pela TI é pautada em um manejo alimentar intensificado, que disponibiliza maior quantidade de energia consumida pelos bovinos de corte, na fase de recria e engorda do seu ciclo de abate. Dessa forma, os animais podem ser abatidos mais precocemente, com menor tempo de engorda para atingir o peso ideal para o abate, juntamente com alterações promovidas em seus sistema digestivo pelo tipo e qualidade das fontes de alimentos fornecidas. A maior disponibilidade de alimentos evita o “efeito sanfona” do gado, de forma que o ganho de massa seja crescente e de forma ininterrupta, podendo ser feito, principalmente pela adição de grãos, farelos, aditivos alimentares e coprodutos, em regimes de produção de confinamento, semiconfinamento e suplementação à pasto (Mapa, 2021).

Os sistemas de produção animal mais intensivos contribuem para uma maior produtividade, por exemplo, por meio da melhoria da qualidade das pastagens já em utilização, com a adoção de sistemas rotativos de semiconfinamento e confinamento. Essa intensificação implica na redução da intensidade de emissão por carcaça produzida, devido ao menor tempo de vida do gado bovino de corte, podendo diminuir até 30% das emissões de metano por quilo de carne produzida, mesmo havendo um possível aumento nas emissões diárias de metano (Berndt et al., 2013).

Exemplo disso foram os resultados gerados por Cardoso et al. (2016), em estudo no qual a intensificação da bovinocultura de corte por meio pastagens com uso de fertilizantes, leguminosas forrageiras, suplementos e concentrados, partindo de um padrão médio de produção baseado em pastagens com baixo uso de insumos, demonstrou ser capaz de reduzir a até um sétimo a área necessária para a produção de



16,2
MtCO₂e

é o potencial de
mitigação até
2030 da técnica
da terminação
intensiva

1 kg de carcaça, com aumento de aproximadamente 51% na produção de carcaças por rebanho, além de uma redução nas emissões de cerca de 49,6%, partindo de 58,3 kg CO₂e/kg de carcaça para até 29,4 kg CO₂e/kg de carcaça.

A meta determinada pelo Plano ABC+ é aumentar a quantidade média de abates de bovinos de corte por meio de TI até 2030 para 500 mil por ano, resultando em 5 milhões de cabeças abatidas. Ao longo da década, o abate desse rebanho com adoção de TI tem potencial de mitigar cerca de 16,25 Mt CO₂e, partindo de um valor médio possível de mitigar de 11,40 kg CO₂e/kg de carcaça. O monitoramento da meta está baseado na quantidade de bovinos de corte abatidos com até 36 meses de vida e de propriedades que utilizam TI (Mapa, 2021). Atualmente não há dados oficiais do monitoramento da quantidade de animais abatidos em sistemas de confinamento, semiconfinamento e suplementação a pasto.

Seguindo como base o mesmo estudo de Cardoso et al. (2016), no qual o Plano ABC+ se baseou, pode-se estimar que a mitigação de metano associada ao emprego de TI é de cerca de 42,3%, para cada quilo de metano por quilo de carcaça de bovino abatido (kg CH₄/kg carcaça). Esse valor foi obtido a partir da média da diferença da emissão de metano proveniente de cenários de produção menos intensivos para os mais intensivos. Os cenários menos intensivos consideram sistema produtivos caracterizados pela na produção de gado em pastagem, variando de pastagens degradadas até o uso de pastagem com uso de leguminosa e pastagens melhoradas com fertilização de nitrogênio devido ao uso de capim-da-guiné (*Panicum maximum*). Já o cenário mais intensivo é definido pelo uso de ração e confinamento nos 75 dias antes do fim da engorda, com a alimentação prévia também sendo feita a partir do uso de pastagem adubada pelo capim-da-guiné.

3.1.3. Melhoramento genético animal (MGA)

A redução da emissão de metano na produção animal pode ser obtida também por meio da promoção do melhoramento genético, promovendo nos cruzamentos a seleção de traços relacionados com menores níveis de emissão de metano por animal. Assim, pode-se garantir o contínuo aumento de produtividade, conciliando-o com a redução da intensidade das emissões dos produtos como carne e leite, juntamente com sistemas produtivos mais sustentáveis por possuírem animais mais eficientes e adaptados (Pickering et al., 2015; Pinto, 2019).

Por meio do MGA, busca-se alcançar melhores indicadores de produtividade animal com a redução da intensidade das emissões, seja por emitir menos e/ou aumentar a produção, como o menor intervalo de tempo de sua reprodução, resistência a doenças, redução da idade da desmama, abate mais rápido devido ao ganho de massa mais eficiente, maior lactação ou prolongamento do período produtivo, como no caso das vacas leiteiras.

A variação genética que influencia o rendimento de metano por produção animal considera a redução da fermentação entérica e a estabilidade de como esse processo ocorre. Mesmo sendo características já conhecidas, a magnitude do potencial de redução de metano pela seleção desses traços nem sempre é totalmente conhecida ou obtida de forma facilitada, dependendo das demais características e variáveis relacionadas com o que esses atributos estão envolvidos, além de técnicas e equipamentos específicos para sua medição direta. Essa limitação de mensuração



pode ser contornada com a seleção de características associadas à produtividade de forma indireta, através de métricas de desempenho animal, como consumo de matéria seca, produção de leite e ganho de massa (Pickering et al., 2015; Congio et al., 2021).

No Brasil, em um estudo de 2018 realizado em conjunto pela CNA (Confederação da Agricultura e Pecuária) e o Cepea (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada), da Esalq/USP, avaliou os ganhos de produtividade da bovinocultura de corte dos estados do Acre, Bahia, Maranhão, Pará e Tocantins depois de investimentos em melhoramento genético e alimentação. Foi observada uma elevação na produtividade de 14,8%, partindo de 4,87 arobas por hectare (@/ha) entre os anos de 2007 e 2012, até chegar em 5,59 @/ha, para o período de 2013 e 2017, além de um aumento de 23% na taxa de reprodução do rebanho.

Em outro estudo, elaborado pelo Cepea (2015), foram analisadas fazendas com ciclo completo (cria, recria e engorda) que fizeram investimento em genética, apresentando uma margem líquida de R\$ 1.926 por hectare, enquanto as demais propriedades típicas da região sem investimento em genética apresentaram o valor de R\$ 32,42 por hectare. Isto demonstra os ganhos econômicos e ambientais de como o investimento genético pode impactar positivamente a pecuária, ainda mais com o foco na redução de suas emissões de GEE.

O potencial de mitigação de emissão de metano associado ao uso de MGA pode variar bastante, dependendo da característica selecionada para o animal, assim como a métrica de emissão de metano escolhida para avaliar a mitigação, podendo-se basear na emissão por produto animal (leite e carne). Assim, foram usados como base valores de redução da emissão de metano por meio de MGA para gado leiteiro de 37,6%, considerando a intensidade de emissão de metano por produção de leite ($\text{g CH}_4/\text{kg}$ de leite), segundo Congio et al. (2021). Já para o gado de corte, tem-se como base a porcentagem de redução de 10,8%, para a intensidade de emissão de metano por produção de carne ($\text{g CH}_4/\text{kg}$ de carne), de acordo com Maciel et al. (2019).

3.1.4. Melhoramento e manipulação da dieta animal

Aproximadamente, de 2% a 12% da energia bruta ingerida pelos animais ruminantes acaba sendo perdida pela conversão em metano. Essa variação na produ-

ção de metano está associada com o nível da digestibilidade dos alimentos que compõem a dieta animal, a quantidade de carboidratos fermentados e de gás hidrogênio (H_2) presentes no rúmen que é utilizado pelas arqueias metanogênicas como fonte de energia, resultando na geração de metano durante o processo de fermentação entérica. Assim, a emissão de metano é um indicativo da perda de energia pelo sistema de produção agropecuário (Machado et al., 2011). Essa perda de energia resultante da fermentação entérica ruminal está relacionada com fatores que envolvem as características genéticas do animal, assim como variáveis referentes à quantidade e qualidade dos alimentos disponíveis para consumo, tipos de carboidratos, digestibilidade dos alimentos e demais recursos empregados na sua nutrição (Sene et al., 2019).

Assim, qualquer estratégia de mitigação de metano por meio do melhoramento e manipulação da dieta animal deve conciliar a diminuição do metano da fermentação entérica com o contínuo aumento da produtividade, principalmente através de melhorias nas condições de pastagens e na composição nutricional oferecida aos animais (Machado et al., 2011).

Segundo dados do Mapbiomas (2022), a área total ocupada por pastagem no país em 2020 foi de 154,7 milhões de hectares, dos quais 52% estavam sob alguma condição de degradação. Toda essa área de pastagens é a principal fonte de energia na alimentação dos bovinos, com a emissão de metano influenciada principalmente pela baixa porção de carboidratos não fibrosos e a maior quantidade de fibras e lignina nos volumosos fornecidos. O tipo e qualidade das gramíneas utilizadas, assim como a produtividade dessas pastagens, influenciam a eficiência energética das dietas praticadas, principalmente em períodos de seca (Sene et al., 2019).

Assim, para promover a intensificação sustentável dos sistemas produtivos pecuários, com a redução da intensidade de emissão de metano por produção animal, faz-se necessária a implementação de melhores práticas de manejo das pastagens e manejo da nutrição animal.

Além do melhor manejo das pastagens, outras estratégias alimentares também podem ser utilizadas com o objetivo de garantir o desempenho dos ruminantes, com ganhos em produtividade e redução de metano.



52%

das pastagens
do país estão
sob algum grau
de degradação

As demais formas de mitigação de metano envolvendo alimentação estão associadas com a alteração das condições encontradas no rúmen no momento da fermentação entérica e complementam as estratégias considerando o pasto como fonte de volumoso (alimento com baixo teor energético e alto em fibras). Assim, pode-se destacar como estratégias possíveis de serem utilizadas na nutrição dos animais ruminantes o aumento do fornecimento de proteína na dieta, a adição de lipídeos (como bolo de soja, óleo de linhaça, óleo de palma e semente de algodão), aumento do nível de alimentação e o uso da suplementação proteico-energética por meio de concentrados (como o milho, semente de algodão, farelo de soja, casca de soja) (Congio et al., 2021).

A suplementação é feita através da disponibilização de rações concentradas, quando se busca garantir o atendimento da demanda nutricional em situações que o pasto não consegue suprir, especialmente em períodos mais secos ou quando se deseja potencializar o desempenho animal. Assim, o desempenho animal é melhorado pelo maior consumo de forragem, na melhoria da digestibilidade e absorção de nutrientes, reduzindo a idade de abate e contribuindo com uma quantidade e qualidade na produção de carcaça maior e, conseqüentemente, redução da emissão de metano por produto (Anjos, 2019; Sene et al., 2019).

O potencial de mitigação de metano estimado para a realização de melhorias na prática de alimentação animal, exclusivamente para a bovinocultura de corte e de leite, está baseado nos resultados apresentados por Congio et al. (2021). Considerando a intensidade de emissão de metano por produto animal, como leite ($\text{g CH}_4/\text{kg}$ de leite) e por ganho de massa ($\text{g CH}_4/\text{kg}$ massa ganha), pode-se obter a média dos valores apresentados para estratégias alimentares que consideram a adoção de práticas como o manejo da pastagem com lotação contínua e rotativa, no fornecimento de alimento com aumento de proteína, uso de concentrados a base de semente de algodão, no aumento de lipídeos na dieta e pelo aumento do nível da alimentação. A partir dessas práticas, foi obtido o valor médio de redução de metano de 31,6% e 13,9% para o gado de corte e leite, respectivamente.

3.1.5. Manipulação da fermentação ruminal

Outra estratégia capaz de reduzir as emissões de metano é a manipulação da fermentação ruminal, na qual ocorre a mitigação por meio da interferência na atividade do rúmen. Ela deve se basear na redução da geração de H_2 já produzido e na alteração da atividade dos microrganismos *Archaea* metanogênicas (arqueias), pela sua inibição ou redução da quantidade de sua população no rúmen. Assim, busca-se conciliar a diminuição do metano da fermentação entérica ao mesmo tempo possibilitar o aumento da produtividade para produtos como carne e leite, reduzindo a intensidade de emissão por unidade de produto ou área (Machado et al., 2011)

Uma das formas de realizar a manipulação ruminal é por meio do uso de aditivos, uma estratégia voltada para o aumento de eficiência alimentar e redução da geração de metano pelos animais ruminantes, auxiliando no melhor aproveitamento e consumo da dieta praticada. O efeito do seu uso ocorre principalmente pela alteração do ecossistema ruminal, com a inibição do processo feito pelas arqueias, o que contribui com a otimização do metabolismo animal, melhor conversão dos alimentos em energia, e aproveitamento dos seus nutrientes.



Entre os diferentes tipos de aditivos, os mais utilizados são ionóforos, leveduras, ácidos orgânicos, extratos naturais, a adição de lipídeos e outros, consumidos em conjunto com os alimentos (Anjos, 2019).

Os ionóforos são aditivos medicamentosos com ação antimicrobiana manipulam a fermentação entérica por meio da alteração no crescimento ou eliminação (defaunação) dos microrganismos produtores de H_2 , sendo capazes de reduzir em até 25% a geração de metano e reduzir o consumo de alimento em 4%, mantendo o desempenho animal (Machado et al., 2011). Somente alguns tipos de ionóforos são permitidos e seu uso não de mantém por longos períodos, não sendo uma estratégia de redução de metano utilizável a longo prazo, justamente por ser um aditivo medicamentoso e pela capacidade do ecossistema ruminal se adaptar aos seus efeitos. Assim, diversos outros inibidores naturais têm ganhado mais destaque (Anjos, 2019).

As leveduras são fungos utilizados para promover a melhor digestão da matéria seca consumida dos alimentos, principalmente das fibras (Anjos, 2019). Os extratos naturais são uma alternativa diante das opções de aditivos químicos, derivados de compostos que protegem as plantas de fungos, bactérias, insetos e até herbívoros. Destaca-se o uso de aditivos contendo taninos, saponinas e óleos essenciais (Machado et al., 2011).

A partir de estudos nacionais, considerando os efeitos gerados pela manipulação direta na atividade ruminal, por meio de dietas, suplementação e uso de aditivos na redução e supressão do H_2 gerado, assim como alteração nos microrganismos metanogênicos no animais da bovinocultura de corte, foi obtido um fator de emissão médio de 37,7 kg CH_4 /cabeça/ano, cerca de 37,4% menos que a média da emissão dos bovinos de corte por fermentação entérica apresentado no último inventário nacional, indicando o potencial que essas estratégias de mitigação de metano possuem quando adotadas adequadamente, mesmo sendo desafiador o uso de recursos como os aditivos em sistemas produtivos à base de pastagem (Berndt et al., 2013; MCTI, 2020b).

Para estimar o potencial de mitigação de metano pela estratégia de manipulação da fermentação ruminal, foi utilizado o valor apresentado por Arndt et al. (2021), que traz o valor de redução de emissão de metano diário (g CH_4 /dia) de 35%.

35%

é o potencial da redução da emissão de metano por manipulação da fermentação ruminal

3.1.6. Práticas de manejo no cultivo de arroz irrigado

A mitigação da emissão de metano no cultivo de arroz irrigado está baseada na adoção de melhores práticas de manejo e do uso do solo, principalmente no Rio Grande do Sul, principal produtor de arroz (Embrapa Arroz e Feijão, 2022; Irga, 2022).

No Estado do Rio Grande do Sul há diferentes tipos de sistemas de preparo do solo, como o sistema de preparo convencional, o sistema de preparo antecipado e outros. No sistema de preparo antecipado são utilizadas práticas mais conservacionistas do solo, como o cultivo mínimo e principalmente o plantio direto, antes da semeadura do arroz.

De 1990 até 2016, a área cultivada com sistema de preparo antecipado teve um aumento de 14,1% para 64,1%, resultando em redução das emissões de metano, pois, enquanto no sistema convencional ocorrem operações de revolvimento do



solo antes da semeadura do arroz e a permanência da matéria orgânica vegetal que será decomposta anaerobicamente por se produzir sob sistema irrigação contínua, no preparo antecipado as operações ocorrem em períodos em que o solo está drenado, promovendo a decomposição aeróbica desses resíduos e, portanto, reduzindo as emissões de metano. Esse preparo antecipado contribui para reduzir atrasos no plantio e perdas de produtividade, sendo iniciado logo após a colheita, gerando ganhos em emissão e aumentando a produtividade (MCTI, 2020d). A alteração no tipo de preparo gera um potencial de redução de metano em torno de 22% (MCTI, 2020d).

Essa mudança no preparo do solo também é corroborada por Zschornack (2011), o qual obteve área de cultivo de arroz irrigado com preparo convencional, cultivo mínimo e plantio direto, apresentando emissões de 537,38 kg CH₄/ha, 391,24 kg CH₄/ha e 372,46 kg CH₄/ha, respectivamente. Esses valores representam uma redução das emissões em 27,2% com uso do cultivo mínimo e de 30,7% para o de plantio direto se comparado com o convencional. Assim, com técnicas de preparo antecipado, é possível reduzir cerca de 28,9% das emissões de metano por área sem que haja redução na produtividade das lavouras de arroz.

Outra prática de manejo capaz de mitigar emissões de metano é o manejo da água nos sistemas produtivos de regime irrigado. Por meio da drenagem da lâmina d'água dos solos continuamente alagados no regime irrigado é possível mitigar emissões sem

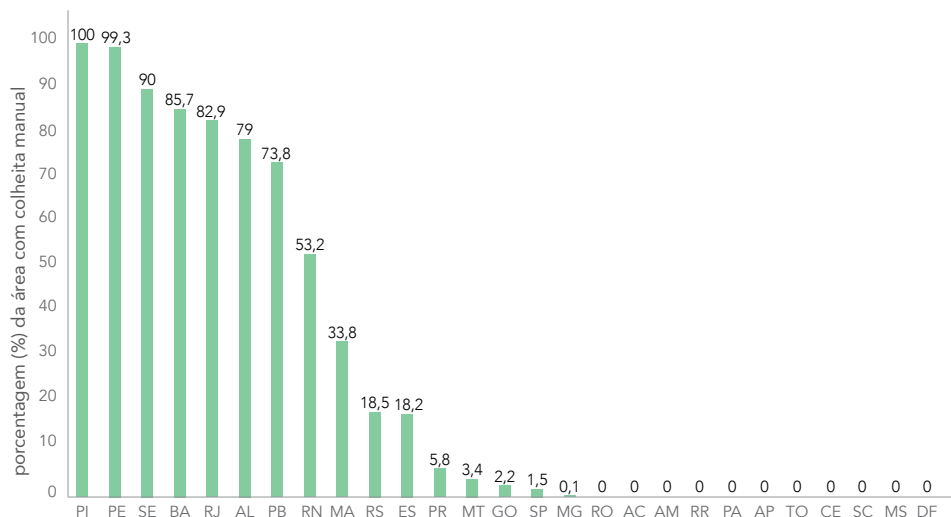
que haja perdas de produtividade. De acordo com Zschornack (2011) e Camargo (2015), taxas de emissão de metano para regimes de irrigação intermitentes foram menores do que os apresentados para regime de irrigação contínua, sendo de 40,8% e de 47,8%, respectivamente.

3.1.7. Redução da queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar

A mitigação das emissões de metano pela queima de resíduos agrícolas da cana-de-açúcar está relacionada com a expansão da área colhida de forma mecanizada, substituindo a colheita manual. A queima dos resíduos da cana ainda é uma prática utilizada para a pré-colheita, facilitando a limpeza das lavouras e a realização das colheitas. Com o emprego da colheita mecanizada, pode-se eliminar totalmente as emissões associadas a essa etapa da produção agrícola, além dos benefícios secundários, como a redução do risco do fogo, melhores condições da qualidade do ar e de segurança de quem realiza a colheita nas lavouras (MCTI, 2020e).

Dessa forma, o potencial de mitigação das emissões pode alcançar índices próximos da totalidade no que se refere à redução do uso do fogo, com a redução de metano estando associada com o aumento da área de colheita mecanizada. A Conab (2021), realiza o levantamento dos Estados em que ainda ocorre colheita manual. A Figura 27 traz as porcentagens de uso de colheita manual praticada nas áreas de lavouras em 2020.

Figura 27.
Porcentagem de área de cultivo de cana-de-açúcar com colheita manual



Fonte: CONAB (2021)



Para alcançar a universalização da colheita mecanizada, há regulamentações que estabelecem metas para seu emprego e de proibição da prática de uso do fogo, além de iniciativas conjuntas públicas e privadas, como o caso do Protocolo Ambiental no Estado de São Paulo. Com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável do setor canavieiro no Estado, o protocolo foi além das regulamentações vigentes (Lei Estadual N°10.547/2000, atualizada pela Lei Estadual N°11.241/2002) ao estabelecer sua meta de redução de queima da cana-de-açúcar de forma antecipada em relação ao que já era previsto por regulamentação estadual, na qual até 2011 já se deveria ter alcançado 70% da área lavoura de cana-de-açúcar sem o emprego do fogo, enquanto as regulamentações previam 50% das áreas para o mesmo ano (IEA, 2012). Outros Estados também estabeleceram legislações visando ao controle e à eliminação da queima, como em Mato Grosso do Sul (Lei Estadual N°3.357/2007), Minas Gerais (Resolução Conjunta SEMAD/IEF N°2.988/2020) e Goiás (Lei Estadual N° 15.834/2006).

3.1.8. Outras formas de mitigação de metano na produção agropecuária

Além das rotas de mitigação já mencionadas, também há as soluções que ainda não possuem escala de aplicação ou que estão em estágios de pesquisa e desenvolvimento. Além do potencial de mitigação possível de ser alcançado dentro das atividades da propriedade rural, também pode-se considerar a mitigação proveniente dos diferentes elos e atores dos sistemas agroindustriais do setor, contemplando não somente as etapas de produção, mas também as etapas referentes aos insumos, processamento, distribuição e consumo.

Exemplo disso é o uso da vacinação contra os microrganismos metanogênicos responsáveis pela produção de metano no rúmen. Ainda é uma prática que precisa ser mais estudada para garantir os impactos desejados (Machado et al., 2011; Subharat et al., 2015). Outras formas de mitigação de metano estão associadas com a redução de perdas e desperdícios de alimentos, além da mudança associada a padrões alimentares e de consumo de alimentos (Unep and Climate and Clean Air Coalition, 2021).

Por fim, outra estratégia com potencial de mitigação de metano, mesmo com variações na sua capacidade, é o uso de algas marinhas na alimentação animal, principalmente para o gado de corte e leite. Diversos resultados indicam a redução da produção de metano mediante o uso de pequenas doses na alimentação dos animais ruminantes, demonstrando a oportunidade em avaliar o potencial de redução de metano de diferentes tipos de algas.

3.2. Mudanças de uso da terra e florestas

No setor de mudanças de uso da terra e florestas, o combate ao uso do fogo é a principal medida mitigadora das emissões de metano provenientes de queimadas, associadas e não associadas ao desmatamento. Primeiramente, o combate ao desmatamento tem papel central na redução das queimadas associadas à abertura de novas áreas. Além disso, o fogo é utilizado como prática agropecuária e como ferramenta auxiliar no processo de desmatamento, e isso se constitui em um hábito cultural na maior parte do território brasileiro. Moratórias de fogo e campanhas



para a redução do uso do fogo como ferramenta agropecuária, acompanhadas de fiscalização efetiva, são estratégias mitigadoras importantes para reduzir as emissões associadas a esses eventos.

Conjuntamente, a prevenção e o combate dos incêndios florestais em áreas naturais, em grande parte de origem antrópica (Schumacher et al., 2020), é medida prioritária. O treinamento e o financiamento das brigadas para combate a incêndios florestais, tanto do Corpo de Bombeiros quanto de órgãos federais como o PrevFogo/Ibama, terão impacto no combate efetivo a esses incêndios. Além disso, a atuação desses órgãos na prevenção dos incêndios inclui a instalação e manutenção de aceiros ao redor de áreas naturais, como Unidades de Conservação, além de queimadas prescritas para redução do material combustível são ferramentas atualmente utilizadas em algumas áreas no bioma Cerrado para ajudar a conter a incidência e as extensões dos eventos de fogo em áreas de vegetação nativa.

No caso das emissões de metano por reservatórios, sugerimos a revisão e interrupção do planejamento e instalação de novas usinas hidrelétricas. Apesar de a legislação brasileira atual exigir a retirada da vegetação previamente ao enchimento de barragens, quantidades significativas de matéria orgânica permanecem no solo, o que pode implicar em emissões substanciais nos reservatórios de usinas hidrelétricas (Fearnside, 2016).

Portanto, sabe-se que as três estratégias mitigadoras mais promissoras para limitar o papel das usinas hidrelétricas nas emissões nacionais de metano incluem: (1) limitar o teor de nutrientes nos reservatórios, com a retirada da vegetação previamente ao enchimento (de Faria et al., 2015; Fearnside, 2016) e com o planejamento dos reservatórios para que estejam distantes ou a montante de fontes exógenas significativas de nutrientes (e.g. áreas agrícolas) (Deemer et al., 2016); (2) o planejamento de reservatórios a fio d'água, que inundem o mínimo possível de área; e (3) o projeto de turbinas mais superficiais, que não movimentem águas profundas, onde há maior concentração de metano (IPCC, 2019). No entanto, essas medidas devem se dar antes da instalação, na fase de planejamento das usinas e seus reservatórios. Para as usinas já instaladas, o tempo desde o alagamento fará grande diferença no decaimento das emissões de metano, em uma taxa ainda não compreendida.

3.3. Tratamento de resíduos

No Brasil existe um arcabouço legislativo importante na gestão de resíduos que contribuem para o potencial de mitigação de emissões de GEE do setor, como por exemplo a Lei nº 12.035/2010 (que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos) e a Lei nº 11.448/2007 (que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico). Essas políticas incorporam a gestão sustentável de resíduos, promovendo práticas de redução da geração, reuso, reciclagem e aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes. Destacam-se também instrumentos como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares)⁸ e o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab)⁹.

⁸ Planares – <https://bit.ly/3cQHz0c>

⁹ Plansab – <https://bit.ly/3TM7qqH>



Além disso, pode-se citar a recente Lei nº 14.026/2020¹⁰ que atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico e que tem como um dos principais objetivos promover a universalização do acesso e efetiva prestação do serviço saneamento básico, de modo a garantir para 99% da população acesso a água potável e para 90% a coleta e tratamento dos efluentes até 31 de dezembro de 2033. Ademais, o marco também busca trazer instrumentos para aumentar a participação privada no setor. No entanto, a questão climática não é citada no documento.

A produção de biogás e biometano, no Brasil, apresenta o maior potencial de recuperação de CH₄ proveniente do tratamento e da disposição final de resíduos sólidos municipais, agrícolas e efluentes líquidos (domésticos e industriais). Segundo a EPE¹¹, observou-se o potencial teórico de geração de 4,9 bilhões de Nm³ (metro cúbico normal) de biogás em 2019. No entanto, transpor o potencial teórico em valor absoluto é um exercício complexo e que depende de vários fatores, principalmente relacionados à universalização do saneamento, como a quantidade da população atendida, percentual atendido por sistemas anaeróbios de tratamento e do fator de produção de biogás. De acordo com informações obtidas no Probiogás¹², apenas 4% do biogás gerado é aproveitado atualmente, devido aos altos níveis de população que ainda não tem acesso aos serviços de saneamento adequados.

A Associação e Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços de Água e Esgoto (Abicon/Sindicon) produziu um documento denominado Agenda Legislativa dos Operadores Privados de Saneamento¹³ apresentado propostas para facilitar a implantação do novo marco regulatório do saneamento básico na perspectiva do setor privado. Nesse material é destacada a importância do Projeto de Lei nº 6559/2013 que dispõe sobre normas sobre a exploração do biogás, visto que o mesmo pode ser um instrumento de incentivo ao uso adequado do biogás gerado em aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes. Atualmente os prestadores de serviços de saneamento descartam a utilização do metano gerado, em especial considerando

os custos com a produção versus as expectativas de recuperação desses custos (Abcon Sindcon, 2022).

Recentemente, em março de 2022, foi lançado o Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos – Metano Zero, visando à utilização de resíduos sólidos para a geração de energia renovável e economicamente viável. O tratamento adequado dos resíduos urbanos e rurais gera biometano¹⁴, um biocombustível gasoso, com diversas aplicações, como: geração de energia elétrica, uso veicular e possível injeção nas malhas de gás natural (MMA,2022).

O documento de lançamento do programa Metano Zero¹⁵ prevê linhas de crédito e financiamento específicas, visando ao desenvolvimento das seguintes ações (MMA,2022):

- A. *Implantação de biodigestores, em especial em áreas rurais;*
- B. *implantação de sistema de purificação de biogás, produção e compressão de biometano;*
- C. *criação de pontos e corredores verdes para abastecimento de veículos pesados movidos a biometano, tais como ônibus, caminhões e implementos agrícolas, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa e para a melhoria da qualidade do ar;*
- D. *implantação de tecnologias que permitam a utilização de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de emissões de gases de efeito estufa em motores de combustão interna de ciclo Otto ou diesel, atendidas as normas fixadas pelos órgãos competentes.*
- E. *alavancagem da utilização ou desenvolvimento da tecnologia veicular*
- F. *desoneração tributária para infraestruturas relacionadas com projetos de biogás e biometano*

O programa estima, como base no total de resíduos gerados por dia no Brasil, a capacidade teórica de aproveitamento de 120 milhões de m³ de biometano por dia, capacidade maior que a do gasoduto Brasil-Bolívia de gás natural (MMA,2022). No entanto, é importante destacar que o uso de biometano

¹⁰ Lei 14.026/2020 – <https://bit.ly/3evV4Da>

¹¹ EPE VII Fórum do biogás – <https://bit.ly/3TLgRXt>

¹² Probiogás (2015) – <https://bit.ly/3qcWZyT>

¹³ Abcon Sindcon – <https://bit.ly/3qcGC5o>

¹⁴ Segundo a resolução ANP nº 685/2017, o biometano é o biogás purificado, apresentando composição obrigatória mínima de 90% de metano (CH₄).

¹⁵ MMA – <https://bit.ly/3AU9WCL>



depende dos meios de distribuição e da presença de gasodutos em pontos estratégicos do país. A ausência de estrutura física dificulta a distribuição desse combustível e reduz seu potencial de aproveitamento. O aproveitamento máximo do potencial de redução das emissões de CH₄ pelo uso do biogás e biometano dependem de fatores como a universalização dos serviços de coleta e tratamento de efluentes e disposição de resíduos sólidos, apoio dos governos federais e estaduais para que municípios tenham recursos suficientes para atender os objetivos do PNRS, bem como amplo acesso às tecnologias disponíveis para gestão de RSU e não limitação de políticas de apoio.

Em linhas gerais, as medidas de mitigação mais relevantes conversam com a implementação das políticas e programas setoriais (e.g. Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Marco Legal do Saneamento, Plano Nacional. Programa Nacional Metano Zero) e também com as medidas previamente estabelecidas na Proposta do Observatório do Clima para a 2ª Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil no âmbito do Acordo de Paris.

As principais estratégias de mitigação para o setor de resíduos podem ser alcançadas, com um número significativo de estratégias de baixo e médio custo, visto que a maioria das tecnologias já estão disponíveis em um nível que permite a utilização em escala econômica. Soluções como separar e tratar resíduos orgânicos por meio de compostagem e digestão anaeróbica, transformando-o em composto e bioenergia; aumentar a recuperação de biogás em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs); e, aproveitar o biogás gerado em aterros sanitários possui um potencial de reduzir entre 30-35% as emissões de metano no setor de resíduos até 2030 (CCAC, 2021). Para que essas soluções sejam factíveis é necessário um aumento no investimento orçamentário do setor chegando ao equivalente a pelo menos 1% do PIB do país, garantindo uma média de R\$20 bilhões por ano ao setor de resíduos (CEBDS, 2020).

Nesse contexto, dentre as soluções já conhecidas e com maior potencial de redução, destacam-se:

• **Resíduos sólidos:**

- Reduzir gradualmente até eliminar a disposição em aterros sanitários de resíduos orgânicos;
- Ampliar e promover a recuperação de energética e queima do gás de aterro sanitário;
- Diversificar as rotas de tratamentos de resíduos sólidos, ampliando taxas de tratamento biológico de resíduos sólidos;
- Reduzir taxas de geração de resíduos em grandes centros.

• **Tratamento de efluentes líquidos:**

- Utilização para tratamento anaeróbico secundário/terciário com recuperação e utilização de biogás;
- Avaliar medidas para tornar mais efetivo e sustentável o tratamento de água e efluentes líquidos domésticos com o objetivo de minimizar as emissões de gases de efeito estufa.

Essas medidas estratégicas e mecanismos que podem propiciar uma gestão mais sustentável de resíduos foram detalhadas na iniciativa SEEG Soluções, processo no qual o Observatório do Clima se propôs a mapear e compilar ações de mitigação e adaptação a nível local, com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável com redução de emissões, instrumentalizando e engajando atores-chave para enfrentarem esse desafio.



3.4. Setor de energia

Como mostrado na seção 2.1.5, a queima de lenha para cocção residencial é uma das maiores fontes de emissão de metano no setor de energia. Assim, superar esse uso da lenha - que indica falta de acesso a fontes energéticas mais eficientes e consequente vulnerabilização social - é uma oportunidade também para mitigar emissões. Ao longo do tempo, a substituição do uso de lenha por fogões a gás - gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gás natural (GN) - foi responsável por uma redução significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Tal substituição produziu um ganho direto na qualidade de vida de pessoas que precisavam coletar lenha para cozinhar e que, além disso, ficavam expostas à poluição do ar no interior de suas casas, gerada pela queima dessa biomassa.

À primeira vista, tal caso em que a substituição de um biocombustível por combustíveis fósseis gera menos emissões de GEE pode parecer contraintuitivo, uma vez que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) pela queima de biocombustíveis não deve ser considerada no balanço geral das emissões, pois a biomassa capturou o mesmo CO₂ da atmosfera durante seu crescimento. Ocorre que a queima da lenha na cocção em condições precárias é muito ineficiente, emitindo mais que o dobro de GEE, somando-se CO₂, CH₄ e óxido nitroso (N₂O), expressos em dióxido de carbono equivalente (CO₂e), do que o GLP e o GN, conforme ilustra a tabela abaixo, cuja última coluna mostra a quantidade de emissões de GEE por energia útil fornecida pelos combustíveis. A coluna "r" indica o fator de eficiência dos fogões para cada tipo de combustível, segundo o Balanço de Energia Útil.

Tabela 8.

Fatores de emissão para aquecimento direto residencial

	KGCO ₂ /TJ	kgCH ₄ /TJ	kgN ₂ O/TJ	kgCO ₂ e/TJ	r	kgCO ₂ e/TJ _{útil}
Gás natural seco	56,100	1.0	1.00	56,393.0	50%	112,786
GLP	63,100	1.1	1.00	63,395.8	50%	126,792
Lenha	-	932.0	9.06	28,496.9	10%	284,969

Fonte: elaborado a partir do SEEG e do Balanço de Energia Útil

Uma outra forma de aprimorar a cocção residencial, e independente do uso de combustíveis fósseis, é o uso de modernos fogões a lenha com queima controlada¹⁶. Tais fogões são projetados para queimar lenha de forma eficiente e não gerar poluição do ar no interior das casas. É importante garantir também que o combustível usado tenha origem certificada, não sendo associado a desmatamento. Há ainda a alternativa do uso de fogões elétricos que, combinada com uma matriz elétrica de baixo carbono, pode reduzir ainda mais as emissões de GEE.

De modo geral e para além do uso de energia na cocção de alimentos, o aumento da eficiência energética em todos os segmentos com consumo de combustíveis também é uma maneira de diminuir as emissões de metano, ao reduzir-se a própria queima de combustíveis.

¹⁶ A Coalizão Clima e Ar Limpo (*Climate and Clean Air Coalition*) e o projeto *Drawdown* defendem a solução: <<https://www.ccacoalition.org/en/content/short-lived-climate-pollutant-solutions&sa=D&source=docs&ust=1648228341939753&usg=AOvVaw1HsDFK6OXa5uYzq9wg6-0a>>, acesso em 16 de março de 2022; e <<https://drawdown.org/solutions/improved-clean-cookstoves&sa=D&source=docs&ust=1648228341959655&usg=AOvVaw1y3SzGkohDWgyh1bfb14t8>>, acesso em 16 de março de 2022.



Como mostrado na seção 2.1.5, as emissões fugitivas da indústria de petróleo e gás natural são outras das maiores fontes de emissão de metano no setor de energia. Recentemente, essa indústria, a nível global, tem anunciado esforços para controlar tais emissões, sendo um exemplo a *Aiming for Zero Methane Emissions Initiative*, lançada em março de 2022 pela *Oil & Gas Climate Initiative*, com vistas ao *Global Methane Pledge*. A iniciativa prevê a eliminação de praticamente todas as emissões de metano dos ativos de petróleo e gás operados pelos signatários até 2030, cabendo a cada um deles definir como atingirá esse objetivo. A brasileira Petrobras figura entre as empresas signatárias, com uma meta de reduzir em 40% sua intensidade de emissões até 2025, com base no ano de 2015.

A fim de apontar o caminho para a redução de emissões de metano, com vistas ao atendimento do Compromisso Global do Metano, as seguintes ações contribuem para mitigar as emissões das principais fontes de metano no setor de energia:

- Substituição de fogões a lenha tradicionais (ou precários) por modernos fogões a lenha, que são mais eficientes;
- Substituição do uso de lenha por GLP nas residências;
- Substituição do uso de combustíveis por energia elétrica nas residências;
- Redução na intensidade de emissões fugitivas de metano na exploração e produção de petróleo e gás;
- Redução da exploração de carvão mineral;
- Adoção de medidas de eficiência energética na indústria, reduzindo a queima de combustíveis.



4 Meta para a redução das emissões de metano

Neste capítulo procurou-se avaliar (i) a direção das emissões de metano no Brasil até 2030 considerando as políticas atuais de mitigação no país (BAU); (ii) o potencial de redução de emissões de metano no Brasil num horizonte de longo prazo; e (iii) uma proposta de meta de redução de emissões alcançável pelo Brasil dentro do horizonte de 2030 de forma compatível com a meta global de redução de 30% das emissões.

Primeiro apresentamos a análise para cada setor e ao final os valores agregados para todo o Brasil.

4.1. Agropecuária

Para a projeção das emissões de metano do setor de agropecuária de 2021 até 2030, foi utilizada a mesma metodologia do Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020a) e realizou-se a projeção de dados de atividades necessários para os cálculos das emissões dos subsetores de manejo de dejetos animais, fermentação entérica, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas.

Para o subsetor de manejo de dejetos animais, foram projetados os dados das populações dos rebanhos de animais de bovinos em sua totalidade e vacas ordenhadas, com base na tendência de aumento desses rebanhos apresentados pelas projeções feitas para o agronegócio brasileiro até 2029, de acordo com a Fiesp (2020). Para o rebanho de bovinos confinados, foi utilizado o dado da Anualpec (2021) de bovinos de corte em sistema de confinamento em 2020 e utilizou-se a projeção de Barbosa et al. (2015) para o número de cabeças de bovinos em confinamento até o ano de 2030.

Para o rebanho de suínos em sua totalidade, foi utilizado o dado de projeção da produção de carne suína (em toneladas) até 2030, de acordo com o MAPA (2021b). Para o rebanho de suínos matrizes, os dados foram alocados anualmente até 2030 de acordo com a porcentagem de participação desse rebanho dentro do rebanho total. Posteriormente, o rebanho de suínos foi classificado entre industriais e de subsistência, conforme a metodologia do Quarto Inventário.

Para os demais rebanhos de animais, como equinos, bubalinos, caprinos, ovinos, asininos, muares, galináceos totais, galináceos galinhas, codornas, e galos, frangos e pintos, os valores foram projetados com base na tendência de crescimento ou diminuição apresentada entre 2010 e 2020.

Para o subsetor de fermentação entérica foram utilizados os mesmos dados projetados para manejo de dejetos animais, com exceção dos dados dos rebanhos de suínos, galináceos totais, galináceos galinhas, codornas, e galos, frangos e pintos. Ainda foram utilizados dados das projeções feitas pelo Mapa (2021b) para a produção de carcaça de bovinos e produção de leite.

Para o subsetor de cultivo de arroz irrigado, utilizou-se a projeção do Mapa (2021b) dos dados de área colhida e produção de arroz (irrigado e sequeiro) até o ano de 2030. Após isso, foram utilizados os dados de 2020 de área e produção de arroz irrigado, disponibilizados pela Embrapa Arroz e Feijão (2021).

Para o subsetor de queima de resíduos agrícolas, tanto a área colhida, quanto a produção de cana-de-açúcar foram utilizados a partir da projeção feita pelo Mapa (2021b) até o ano de 2030. Para a projeção da área com colheita manual, foi utilizada a média da variação anual de 2011 até 2021.

Após projetados todos os dados de atividade da pecuária e agricultura necessários, pode-se calcular as emissões de metano para três cenários diferentes de mitigação: o cenário de emissões considerando as políticas e medidas de mitigação já previstas (BAU), o cenário com proposta de meta de redução de 30% das emissões do setor até 2030 em comparação com 2020 (Meta) e, por último, o cenário de potencial de redução teórico (Potencial).

Para cada cenário, as estratégias de mitigação foram aplicadas às respectivas fontes e atividades emissoras de metano, sendo utilizado o potencial de mitigação de acordo com premissas e taxas de adoção dessas práticas e tecnologias de mitigação.

Vale destacar que para o subsetor de fermentação entérica, as estratégias de redução de emissão via terminação intensiva (TI), melhoramento genético animal (MGA) e melhoramento e manipulação da dieta animal tiveram o cálculo realizado a partir da aplicação do potencial mitigação de metano por unidade de produto animal (carcaça e leite), mediante premissas de taxas de adoção das práticas de manejo e tecnologias relacionadas. Para a estratégia de mitigação de manipulação da fermentação ruminal, o seu potencial de mitigação foi estimado através da multiplicação do fator de emissão de cada categoria de rebanho animal pelo potencial de redução adotado para essa via de mitigação. Ao final, realizou-se a soma do valor de mitigação de cada estratégia, para se comparar com o cenário de emissões BAU.

Para o subsetor de manejo de dejetos animais, cultivo de arroz irrigado e queima de resíduos agrícolas, o potencial de mitigação estimado foi feito a partir da alteração de fatores de emissão e parâmetros de cálculo que representassem as premissas e taxas de adoções esperadas para cada cenário avaliado.

A Tabela 09 traz as premissas adotadas para o cálculo das estimativas de cada subsetor para os cenários projetados (BAU, Meta e Potencial), considerando as taxas de adoção para o emprego das práticas e tecnologias de redução de metano e as fontes e atividades emissoras para que foram contabilizadas as mitigações de acordo com cada estratégia abordada.



Tabela 9.

Considerações para o cálculo do potencial de mitigação de cada estratégia de mitigação adotada para os cenários de emissões BAU, Meta e Potencial

SUBSETOR	ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO	BAU	META	POTENCIAL
Manejo de Dejetos Animais	Tratamento de Dejetos Animais (TDA) da Produção Pecuária	Suínos Industriais: Aumento de 27% de participação de Biodigestor da parcela do Liquid/Slurry (com cobertura de crosta natural) e conversão total (100%) do sistema de Lagoa Anaeróbica para Biodigestor	Suínos Industriais: Aumento de 45% de participação de Biodigestor da parcela do Liquid/Slurry (com cobertura de crosta natural) e conversão total (100%) do sistema de Lagoa Anaeróbica para Biodigestor Bovinos de corte (confinados): Aumento da participação do sistema de Piso de Confinamento (Dry Lot) até alcançar média de 92% de participação no tratamento, ao substituir o sistema de Armazenamento Sólido Bovinos de leite (alta produção): Aumento da participação do sistema de Biodigestor até alcançar média de 11,5% de participação no tratamento, ao substituir o sistema de Lagoa Anaeróbica Bovinos de leite (baixa produção): Conversão total (100%) do sistema de Armazenamento Sólido para Compostagem	Suínos Industriais: Aumento de 100% de participação de Biodigestor em relação ao Liquid/Slurry (com cobertura de crosta natural) e conversão total (100%) do sistema de Lagoa Anaeróbica para Biodigestor Bovinos de corte (confinados): Substituição do sistema de Armazenamento Sólido para Piso de Confinamento (Dry Lot) em 100% Bovinos de leite (alta produção): Sistema de Pastagem permanece igual e substituição de 100% do sistema de Lagoa Anaeróbica para Biodigestor Bovinos de leite (baixa produção): Conversão total (100%) do sistema de Armazenamento Sólido para Compostagem
Fermentação Entérica	Terminação Intensiva (TI)	Abatimento de 5 milhões de cabeças até 2030 (média anual de 500.000 cabeças ao ano até 2030) (Fonte: Plano ABC+)	Cerca de 30% dos animais abatidos por meio de TI até 2030 (Abatimento de 91,3 milhões de cabeças até 2030)	Alcance de 100% dos abates de bovinos pelo uso TI até 2030 (Abatimento de 304,4 milhões de cabeças até 2030)
	Melhoramento Genético Animal (MGA)	–	Bovinos de Corte e Leite: Aumento anual de 3% dos bovinos de corte e leiteiros produzindo gerados por MGA	Bovinos de Corte e Leite: Aumento anual de 10% dos bovinos de corte e leiteiros produzindo gerados por MGA
	Manipulação da Fermentação Ruminal	–	Bovinos de Corte (confinados) e de Leite (alta produção): Aumento anual de 4,5% dos bovinos de corte e leiteiros produzindo gerados por Manipulação da Fermentação Ruminal	Bovinos de Corte (confinados) e de Leite (alta produção): Aumento anual de 10% dos bovinos de corte e leiteiros produzindo gerados por Manipulação da Fermentação Ruminal
	Melhoramento e Manipulação da Dieta Animal	–	Bovinos de Corte e Leite: Aumento anual de 6,5% dos bovinos de corte e de leite com melhor dieta	Bovinos de Corte e Leite: Aumento anual de 10% dos bovinos de corte e de leite com melhor dieta
Cultivo de Arroz Irrigado	Práticas de Manejo no Cultivo de Arroz Irrigado	–	Rio Grande do Sul (RS): Conversão de 75% da área produtiva do estado (preparo convencional e outros) para preparo antecipado RS e Demais UF: Adoção anual de 2% de manejo da irrigação	Rio Grande do Sul (RS): Conversão de 100% da área produtiva do estado (preparo convencional e outros) para preparo antecipado RS e Demais UF: Adoção anual de 2% de manejo da irrigação
Queima de Resíduos Agrícolas	Redução da Queima dos Resíduos Agrícolas da Cana-de-açúcar	–	Redução de 50% da prática manual de colheita para cada UF (aumento de 50% da colheita feita de forma mecanizada)	Redução de 100% da prática manual de colheita para cada UF (aumento para 100% da colheita feita de forma mecanizada)



Considerando o cenário de emissões BAU, estima-se que haveria um aumento de 5,66% das emissões de metano em 2030 em comparação com 2020, alcançando o valor de 15,37 Mt CH₄. Para o cenário de proposta de meta de redução de 30% das emissões do setor até 2030 em comparação com 2020 (Meta), contabilizou-se uma mitigação com valor acumulado de 34,23 Mt CH₄ ao longo do período de dez anos, alcançando em 2030 a emissão de 10,17 Mt CH₄. Já para o cenário de emissões considerando o potencial de redução teórico (Potencial) foi estimada uma redução de 77,45% das emissões de metano em 2030 em comparação com 2020, além de apresentar o valor de mitigação acumulado de 86,97 Mt CH₄ ao longo dos dez anos, alcançando a emissão hipotética de 3,28 Mt CH₄. A Tabela 10 e a Figura 28 trazem os valores estimados e projetados das emissões de cada subsetor para estes cenários e o total do setor agropecuário, respectivamente.

Tabela 10.

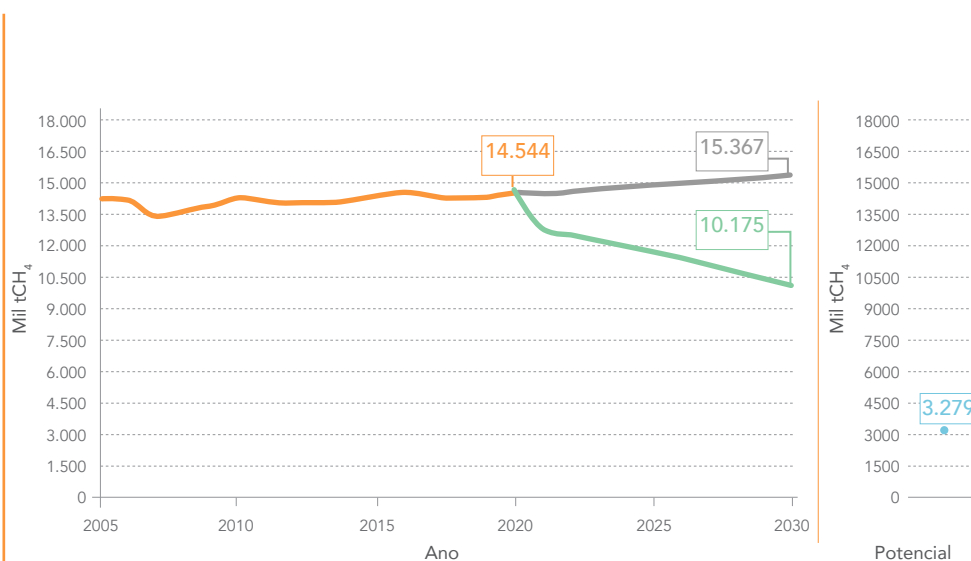
Projeções das emissões de metano (mil tCH₄/ano) para o setor agropecuária até 2030.

Mil CH ₄	MANEJO DE DEJETOS ANIMAIS		FERMENTAÇÃO ENTÉRICA		CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO		QUEIMA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS		TOTAL		
	ANO	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META
2020		845,15	845,15	13.320,48	13.320,48	370,34	370,34	7,72	7,72	14.543,69	14.543,69
2021		804,63	787,54	13.347,15	11.636,79	353,86	349,17	8,69	8,69	14.514,33	12.782,20
2022		803,42	770,97	13.462,13	11.412,99	325,65	317,06	8,62	8,34	14.599,82	12.509,35
2023		804,41	756,06	13.578,79	11.184,37	307,89	295,75	8,60	7,96	14.699,69	12.244,13
2024		804,18	739,45	13.695,39	10.949,20	291,64	276,36	8,59	7,54	14.799,81	11.972,56
2025		804,70	723,01	13.812,25	10.707,79	271,32	253,61	8,59	7,09	14.896,86	11.691,51
2026		803,51	704,42	13.928,96	10.459,75	250,26	230,74	8,60	6,61	14.991,33	11.401,53
2027		801,95	684,94	14.045,72	10.205,27	230,54	209,65	8,61	6,09	15.086,82	11.105,95
2028		799,25	663,88	14.162,40	9.944,21	210,87	189,13	8,63	5,55	15.181,15	10.802,76
2029		796,38	642,10	14.279,24	9.676,82	190,42	168,44	8,66	4,96	15.274,70	10.492,32
2030		792,81	619,14	14.396,19	9.403,05	169,61	147,97	8,69	4,35	15.367,30	10.174,50
Potencial		923,72		33.127,97		164,20		19,11		34.235,00	

Figura 28.

Emissões de metano (mil tCH₄/ano) por setor de agropecuária para os cenários BAU, Meta e Potencial projetados até 2030

SEEG
BAU
Meta



2028

foi a data
proposta pelo
Brasil para errar
o desmatamento
ilegal

4.2. Mudanças de uso da terra e florestas

A NDC proposta pelo Observatório do Clima em 2021 propôs um decréscimo das emissões brutas no setor MUT de forma a zerar o desmatamento até 2030, enquanto permite um nível constante de emissões relacionadas a outros tipos de mudança de uso da terra (OC, 2021). Ao mesmo tempo, na COP26, em Glasgow em 2021, o ministro do Meio Ambiente fez a promessa de que o Brasil zeraria o desmatamento ilegal em 2028. Nesse contexto, construiu-se dois cenários projetados de emissões de metano por queimadas associadas ao desmatamento. O primeiro cenário configura o potencial máximo de redução, considerando que as emissões de metano causadas por queimadas associadas ao desmatamento decairão exponencialmente até zerar em 2030.

O segundo cenário, mais conservador, é a meta que propomos. Ele considera que a proporção dessas emissões com indícios de ilegalidade decairá até zerar em 2028, enquanto a proporção sem indício de ilegalidade permanecerá constante com relação aos níveis de 2020. Esses indícios incluem a inexistência de autorizações de supressão da vegetação, a sobreposição com áreas protegidas por lei (Unidades de Conservação e Terras Indígenas), áreas protegidas dentro dos imóveis rurais (Reserva legal e Área de Preservação Permanente), áreas sob embargo e áreas de Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) (MapBiomias, 2021).

A proporção média de áreas desmatadas com indícios de ilegalidade por bioma considerando o período de 2019 a 2021 foi calculada pela iniciativa MapBiomias Alerta e está apresentada na Tabela 11. Essas metas foram então comparadas com um cenário *business-as-usual* (BAU) em que o desmatamento continuará com a mesma taxa que a observada em 2020 (Tabela 11).

Com relação às emissões por queimadas não associadas ao desmatamento, construímos um primeiro cenário, que representa o potencial máximo de redução e que consiste no abandono da prática de renovação de terreno de pastagem e cultivos agrícolas com o uso do fogo, além da eliminação das queimadas antrópicas em áreas naturais. Considerando que o fogo pode ocorrer de forma natural em alguns biomas, como o Cerrado e o Pantanal, nós definimos uma proporção de fogo que deve ser por causas naturais nesses dois biomas, devido ao fato de ocorrerem em épocas mais chuvosas. Por saber que se trata de eventos raros, delineamos as estações em que o fogo ocorre de forma menos intensa nos dois biomas com base na área de cicatrizes de fogo mapeadas pela iniciativa MapBiomias Fogo (Figura 29). Com isso, os períodos de queimadas não antrópicas foram determinados como de novembro a abril no Cerrado e de janeiro a maio no Pantanal.

Ao longo de todo o período analisado, de 1985 a 2020, isso representa uma proporção estimada de queimadas naturais de 0.03% no Pantanal e 0.07% no Cerrado (Tabela 11). É fato que parte dessas queimadas ainda pode ser de origem antrópica, mas, na falta de um método mais preciso de classificação de queimadas naturais nesses biomas, escolhemos ser conservadores e classificar mais eventos de fogo como naturais, de forma a comportar uma proporção maior de eventos ainda em 2030.



O segundo cenário proposto com relação às queimadas não associadas ao desmatamento é mais conservador e, além de permitir essa proporção considerada natural no Cerrado e no Pantanal, consiste em considerar a não-exclusão da prática de uso do fogo para limpeza e renovação de áreas já abertas (Meta). Esse cálculo se baseou na proporção de áreas queimadas não associadas ao desmatamento em classes de pastagem e áreas agrícolas em cada bioma, de acordo com o MapBiomias Fogo (Tabela 11). Finalmente, um cenário *business-as-usual* (BAU) também é apresentado, em que as queimadas não associadas ao desmatamento continuarão nas mesmas proporções que as observadas em 2020 (Tabela 11).

Figura 29. Distribuição mensal das áreas queimadas nos biomas Cerrado e Pantanal no total do período de 1985 a 2020, segundo o MapBiomias Fogo, usada para definir os períodos de queimadas naturais durante a estação chuvosa: de novembro a abril para o Cerrado e de janeiro a maio no Pantanal

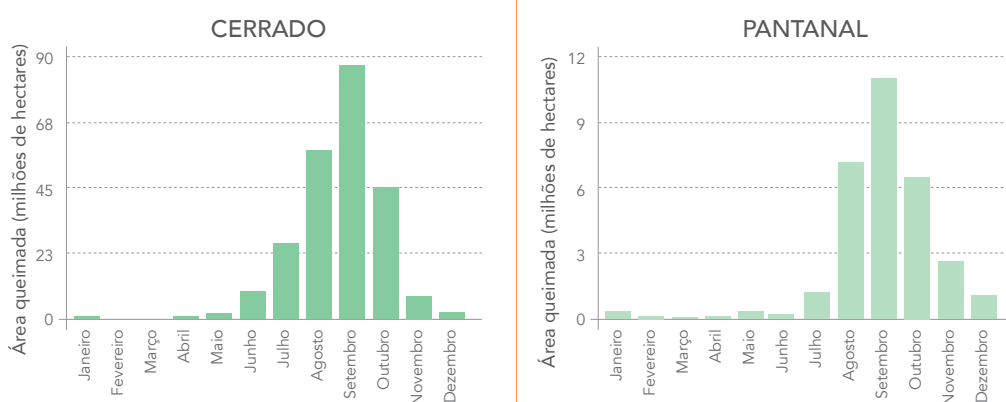


Tabela 11.

Dados utilizados para cálculo dos cenários futuros de queimadas associadas e não associadas a desmatamento. A proporção de desmatamento com indícios de ilegalidade é a média dos três anos reportados pelo Relatório Anual de Desmatamento do MapBiomias Alerta (MapBiomias, 2021). As proporções de fogo considerado natural e de fogo em áreas de agropecuária se basearam nas áreas mensais de cicatrizes de fogo por bioma mapeadas pelo MapBiomias Fogo

BIOMA	QUEIMADAS ASSOCIADAS AO DESMATAMENTO	QUEIMADAS NÃO ASSOCIADAS AO DESMATAMENTO	
	PROPORÇÃO DE DESMATAMENTO COM INDÍCIOS DE ILEGALIDADE (2019-2021)	PROPORÇÃO DE FOGO CONSIDERADO NATURAL (2016-2020)	PROPORÇÃO DE QUEIMA EM ÁREA DE AGROPECUÁRIA (1990-2020)
Amazônia	99%	-	61%
Caatinga	99%	-	10%
Cerrado	99%	0,07%	8%
Mata Atlântica	89%	-	38%
Pampa	100%	-	35%
Pantanal	99%	0,03%	6%

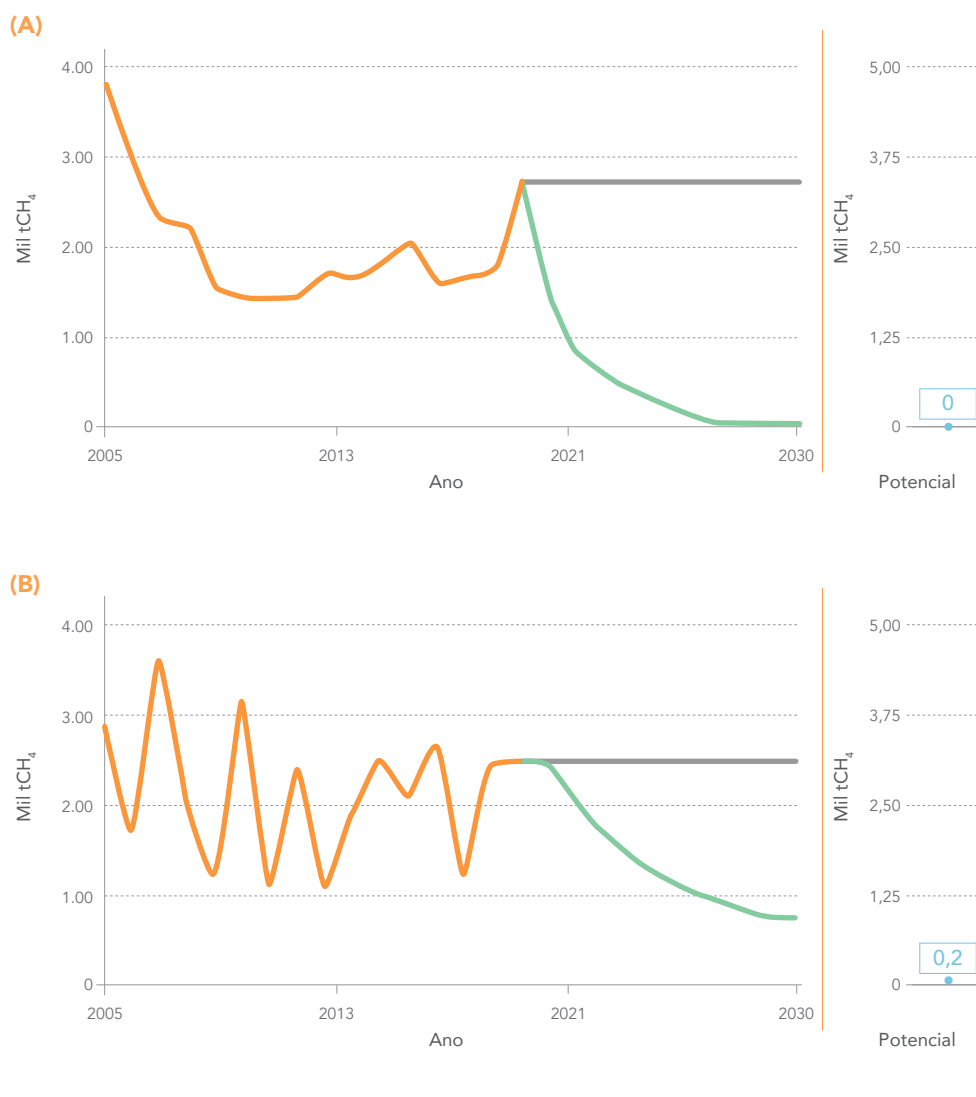


Tabela 12.

Descrição dos cenários propostos para o setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas e seus critérios.

SUBSETOR	BAU	META	POTENCIAL
Queimadas associadas a desmatamento	Desmatamento com a mesma taxa que a observada em 2020	Desmatamento com indícios de ilegalidade zerados em 2028 Desmatamento sem indícios de ilegalidade nos mesmos níveis que em 2020	Desmatamento zero em 2030
Queimadas não associadas a desmatamento	Área queimada nas mesmas proporções que as observadas em 2020	Eliminação das queimadas antrópicas em áreas cobertas por vegetação nativa Não exclusão do uso do fogo como prática de renovação de terreno em áreas de pastagem e cultivos agrícolas	Eliminação das queimadas antrópicas em áreas cobertas por vegetação nativa Exclusão do uso do fogo como prática de renovação de terreno em áreas de pastagem e cultivos agrícolas

Figura 30.
Cenários de trajetória das emissões brutas de metano por queimadas associadas (A) e não associadas (B) ao desmatamento, considerando o cenário *business-as-usual* (BAU), as metas propostas e o potencial máximo de redução



O cenário Meta relacionado às queimadas associadas a desmatamento implica em atingir 29 mil toneladas de CH₄ em 2028, contra uma estimativa de 2,7 milhões de toneladas de CH₄ de acordo com o cenário BAU (Figura 30A; Tabela 13). O potencial, com relação às queimadas associadas a desmatamento, é de zero, considerando a exclusão de todo tipo de desmatamento, com ou sem indícios de ilegalidade, até 2030.

Com relação às queimadas não associadas a desmatamento, o cenário potencial é zerar todas as queimadas de origem antrópica até 2030, enquanto se considera a ocorrência de uma pequena proporção de queimadas consideradas de origem natural no Cerrado e no Pantanal, o que resulta em 23 mil toneladas de CH₄ em 2030. A meta projetada, que adicionalmente considera a ocorrência de fogo em áreas de agropecuária, alcançaria 190 mil toneladas de CH₄ em 2030, contra 623 mil toneladas de CH₄ no cenário BAU (Figura 30B; Tabela 13).

No total, a meta para o setor, considerando as duas categorias (queimadas associadas e não associadas ao desmatamento), fica em 219 mil toneladas de metano, em comparação com uma projeção de 3,33 milhões de toneladas em 2030 (Figura 31).

Figura 31.

Projeções consolidadas das emissões de metano do setor de Mudanças de Uso da Terra e Florestas, considerando o total das estimativas (queimadas associadas e não associadas a desmatamento), incluindo o histórico de 2005 a 2020 (SEEG), o cenário *business-as-usual* (BAU) e a meta até 2030, e o potencial máximo de redução

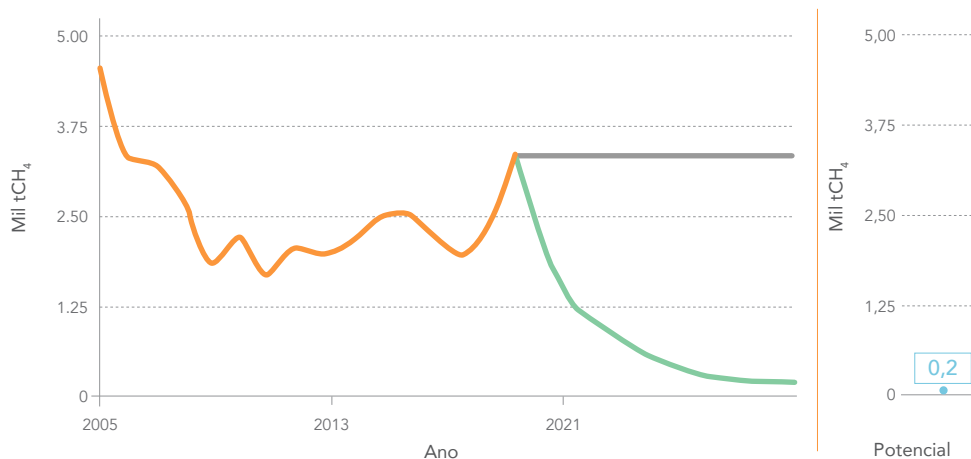


Tabela 13. Trajetória de emissões brutas (milhões de toneladas) de metano considerada nos cenários projetados (BAU e Meta) para queimadas associadas e não associadas ao desmatamento, incluindo o potencial máximo de redução para 2030

Mil CH ₄	QUEIMADAS ASSOCIADAS A DESMATAMENTO		QUEIMADAS NÃO ASSOCIADAS A DESMATAMENTO		TOTAL	
	BAU	META	BAU	META	BAU	META
2020	2,71	2,71	0,62	0,63	3,34	3,34
2021	2,71	1,48	0,62	0,62	3,34	2,10
2022	2,71	0,81	0,62	0,52	3,34	1,32
2023	2,71	0,57	0,62	0,43	3,34	1,01
2024	2,71	0,39	0,62	0,37	3,34	0,76
2025	2,71	0,25	0,62	0,31	3,34	0,56
2026	2,71	0,14	0,62	0,27	3,34	0,41
2027	2,71	0,05	0,62	0,24	3,34	0,29
2028	2,71	0,03	0,62	0,22	3,34	0,24
2029	2,71	0,03	0,62	0,20	3,34	0,22
2030	2,71	0,03	0,62	0,19	3,34	0,22
Potencial	0		0,02		0,02	



4.3. Resíduos

Para a projeção das emissões de metano do setor de resíduos de 2021 até 2030, foram adotadas premissas baseadas no Planares, Plansab e na NDC proposta pelo OC. Nesse contexto são apresentados três cenários setoriais para as emissões de CH₄. O primeiro é o *business-as-usual* (BAU), cenário de referência, no qual foi considerada projeção linear com base no histórico de emissões. Esta abordagem culminou em uma taxa de aumento de emissões equivalente a 25,8% em 2030 com relação a 2020.

6,5%

é a redução das
emissões por
resíduos até 2030
no cenário Meta

O segundo cenário, denominado Meta, considerou o alinhamento do setor de resíduos com as metas das políticas públicas e medidas adicionais de mitigação, em conformidade com os horizontes temporais apresentados no Planares visando alcançar a meta de redução de 30% das emissões de CH₄. As projeções do cenário Meta podem chegar a uma redução de 6,5% das emissões do setor em 2030 com relação a 2020. Por último, o cenário Potencial, considerou uma proposta de redução mais ambiciosa do que o cenário Meta, adiantando os objetivos do Planares de 2040 para 2030, bem como incorporando medidas apresentadas no estudo 'Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil', elaborado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, e referências adicionais. As projeções do potencial de redução do setor de resíduos sob uma ótica mais ambiciosa pode culminar na redução de 35,95% das emissões do setor em 2030 com relação a 2020. Para os cenários Meta e Potencial não se prevê aumento de emissões de CH₄ do setor. A Tabela 14 apresenta as premissas e considerações adotadas para as estimativas de cada projeção.

Tabela 14.
Premissas utilizadas para
o setor de resíduos

BAU	META	POTENCIAL
Tendência de crescimento linear da geração de resíduos - taxa de crescimento total de 14% 2020-2025 e 12% 2025-2030.	Aumento de 1,5 % na geração de 2020-2025 e 1,2% 2025-2030; Desvio de pelo menos 8,1% de todos os resíduos orgânicos de aterros sanitários até 2030; Recuperar ou queimar pelo menos 50% de biogás gerado por aterros; Desvio de 12,5% da fração de secos até 2030; Erradicar todos os lixões até 2024.	Manutenção das taxas atuais de geração – decorrentes da implementação de políticas de não geração e redução de geração; Desvio de pelo menos 14% de todos os resíduos orgânicos de aterros sanitários até 2030; Recuperar ou queimar 75% de biogás gerado por aterros; Reciclar 20% de todo papel de resíduos domiciliares até 2030; Erradicar todos os lixões até 2024; Ampliar a taxa de aproveitamento de biogás em ETEs (potencial de redução de cerca de 200 mil toneladas de CH ₄).

A Tabela 15, apresenta as projeções de emissões de metano até 2030 para cada cenário de proposta de redução.



Tabela 15.

Projeções de emissão de metano por cenário para o setor de resíduos

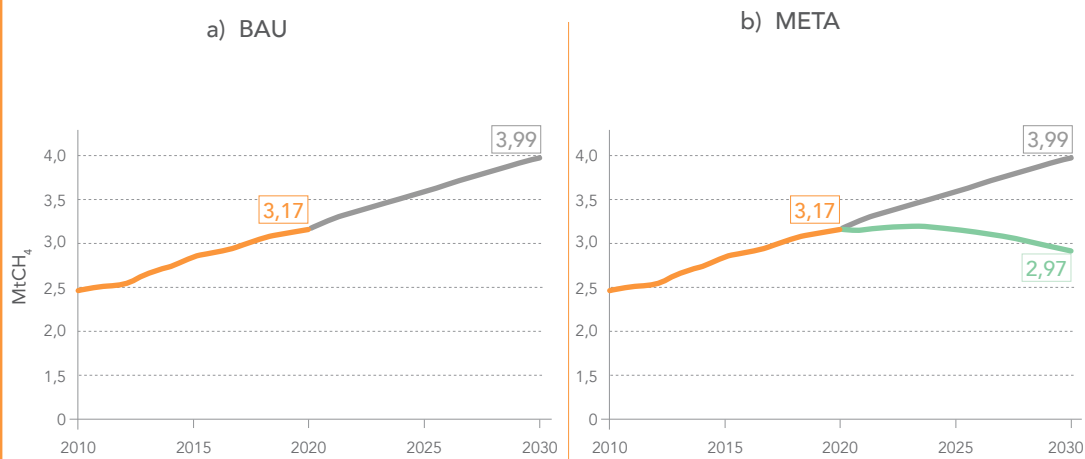
mil tCH ₄	RESÍDUOS SÓLIDOS		TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS		TOTAL	
	BAU	META	BAU	META	BAU	META
2020	2.154	2.154	1.021	1.021	3.175	3.175
2021	2.237	2.094	1.061	1.061	3.298	3.158
2022	2.290	2.087	1.085	1.085	3.375	3.176
2023	2.342	2.074	1.110	1.110	3.452	3.188
2024	2.394	2.053	1.135	1.135	3.529	3.191
2025	2.447	2.020	1.160	1.160	3.607	3.183
2026	2.499	1.974	1.185	1.185	3.684	3.162
2027	2.551	1.917	1.210	1.210	3.761	3.130
2028	2.604	1.849	1.234	1.234	3.838	3.086
2029	2.656	1.770	1.259	1.259	3.916	3.032
2030	2.709	1.682	1.284	1.284	3.993	2.969
Potencial	961		1.072		2.033	

Em 2030, o cenário BAU apresentou um aumento de 0,82 MtCH₄, equivalente a cerca de 25,8% em relação às emissões de 2020. Já as projeções para a Meta apresentam uma redução de 0,20 MtCH₄ para o mesmo período, ou seja, as hipóteses sugeridas na Tabela 14 para o cenário Meta conseguem alcançar uma redução de 6,5% das emissões do setor de resíduos em relação às emissões de 2020.

A projeção das emissões para o cenário Meta indica que as principais estratégias de mitigação para o setor de resíduos podem ter resultados, ainda que não consigam atingir a meta dos 30% de redução, com um número significativo de estratégias de baixo e médio custo, visto que a maioria das tecnologias já está disponível em um nível que permite a sua utilização em escala econômica. Além disso, as medidas de mitigação mais relevantes dialogam com a implementação das políticas e programas setoriais, indicando a importância da execução desses planos, não apenas em uma perspectiva de melhoria da qualidade de vida e do meio ambiente, mas também sob a lente climática. A Figura 32 traz as projeções das emissões de metano até 2030, considerando as hipóteses da Tabela 14 e as emissões da Tabela 15.

Figura 32. Projeções das emissões de metano do setor de resíduos, considerando o histórico até 2020 (SEEG), cenário *business-as-usual* (BAU) e Meta.

SEEG
BAU
Meta

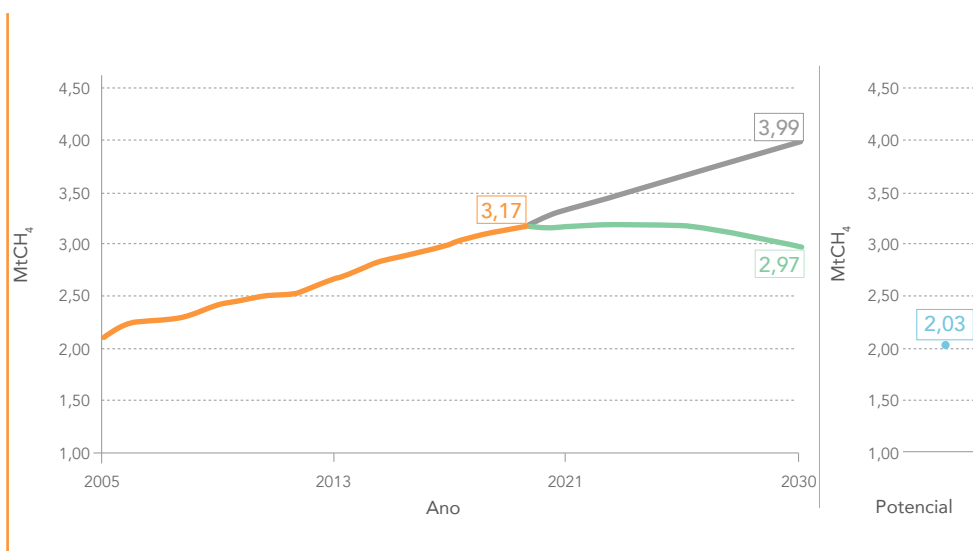


As estimativas de emissões para cenário Potencial configuram maior ambição, projetando um potencial mais significativo de redução de CH₄ para o setor de resíduos. As hipóteses utilizadas foram apresentadas na Tabela 14.

As premissas adotadas para o cenário Potencial seguem convergindo com os planos setoriais, mas de forma um pouco mais ambiciosa. Além disso, também é considerado o máximo do potencial de recuperação ou eficiência de coleta de 75%¹⁷ de todo o biogás gerado nos aterros sanitários, além da ampliação do aproveitamento de biogás em ETEs (potencial de redução de cerca de 200 mil toneladas de CH₄). Não é previsto aumento de emissões no setor para alcançar esse potencial. A Figura 33 traz as projeções das emissões de metano até 2030, considerando as hipóteses da Tabela 14 e as emissões da Tabela 15 e o potencial máximo de redução que o setor apresenta.

Figura 33.
Projeções das
emissões de metano
do setor de resíduos,
considerando o
cenário e o potencial
que o setor tem
de redução

■ Histórico (SEEG)
■ BAU
■ Meta



4.4. Setor de energia

A fim de apontar o caminho para a redução de emissões de metano no setor de energia, com vistas ao atendimento do Compromisso Global do Metano, realizou-se aqui um exercício de projeção de emissões com a aplicação das medidas de mitigação citadas no capítulo 3.

Para tanto, primeiramente foram projetadas as emissões de metano com base nas projeções energéticas do Plano Decenal de Energia 2031, resultando em 597 mil toneladas estimadas para 2030, constituindo um aumento de 4% nas emissões em relação às 572 mil toneladas estimadas em 2020. Na Figura 34, esse cenário é denominado BAU.

¹⁷ Em aterros a quantidade de biogás que é produzida depende da tecnologia empregada e deve-se levar em consideração a eficiência do sistema, a USEPA (United States Environmental Protection Agency) recomenda a eficiência de 75%. A eficiência dos sistemas de produção e Biogás, geralmente, variam entre 50% e 75%. Biogas Toolkit - <https://bit.ly/3eMa5Rk>



Um segundo cenário foi construído, considerando as ações de mitigação a serem implementadas até 2030, conforme a tabela 16. Esse cenário resultou em emissões de metano estimadas em 391 mil toneladas, um patamar 32% menor do que as emissões estimadas para 2020, estando de acordo, portanto, com o objetivo do acordo do metano. Na Figura 31 são mostradas as trajetórias de emissões de metano projetadas, sendo o segundo cenário chamado de Meta.

Além dos cenários BAU e Meta, foi realizado também um exercício de projeção de emissões com um objetivo mais ambicioso e de longo prazo, chamado Potencial, no qual foram vislumbradas medidas que maximizam a redução de emissões. Para fins deste exercício, foi considerado o ano de 2050 e as ações listadas na Tabela 16. Como resultado, as emissões de metano do setor de energia poderiam chegar ao patamar de 210 mil toneladas.

Tabela 16.

Premissas adotadas
para os cenários no
setor de energia

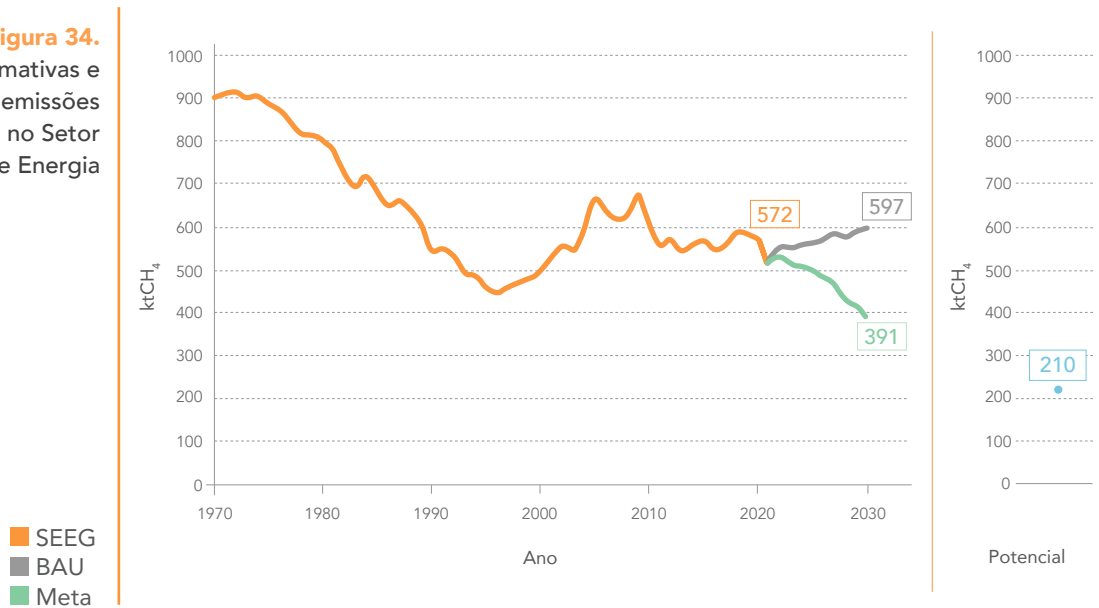
BAU
<ul style="list-style-type: none"> • Baseado no Plano Decenal de Energia 2031
META
<ul style="list-style-type: none"> • Substituição total do uso de lenha em áreas urbanas por GLP até 2030. Considerou-se que 38% do consumo de lenha se dá em áreas urbanas, conforme Nota Técnica da EPE³. • Redução de 30% no consumo projetado de lenha em áreas rurais para 2030, o que poderia ser alcançado a partir da aplicação de modernos fogões a lenha, que são mais eficientes. • Redução de 10% no consumo projetado de combustíveis na indústria para 2030, o que poderia ser alcançado por medidas de eficiência energética. • Redução na intensidade de emissões fugitivas de metano na exploração e produção de petróleo e gás, para toda a operação no Brasil até 2025, em consonância com a meta da Petrobras⁴. • Redução pela metade da intensidade de emissões fugitivas de metano na exploração e produção de petróleo e gás, para toda a operação no Brasil entre 2025 e 2030, aproximando-se à meta de eliminação das emissões da <i>Aiming for Zero Methane Emissions Initiative</i>.
POTENCIAL
<ul style="list-style-type: none"> • Eletrificação total do consumo residencial de energia; • Produção de petróleo e gás natural atingindo o pico em 2030 e depois passando a decrescer; • Controle total das emissões fugitivas da exploração e produção de petróleo e gás natural; • Eliminação da exploração do carvão mineral; • Continuidade da redução da intensidade de emissão do transporte; • Intensidade de emissão da geração elétrica atingindo o pico em 2035 e depois passando a decrescer; • Continuidade da redução da intensidade de emissão de "outros do setor de energia".

³ Nota Técnica EPE DEA 016/2021, Consumo de Lenha e Carvão Vegetal, Setor Residencial Brasil, disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/Nota%20T%C3%A9cnica%20Consumo%20de%20lenhaCV%20-%20Residencial%20final%202021.pdf>

⁴ Caderno de Mudança do Clima da Petrobras (2022), disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/25fdf098-34f5-4608-b7fa-17d60b2de47d/d7092e4e-9830-c6b1-ff36-62247b97a17a?origin=1>



Figura 34.
Estimativas e
projeções de emissões
de metano no Setor
de Energia



A Tabela 17 mostra as emissões projetadas neste exercício, desagregadas de acordo com as maiores fontes emissoras do Setor de Energia.

Tabela 17.
Projeções de
emissões de metano do
Setor de Energia

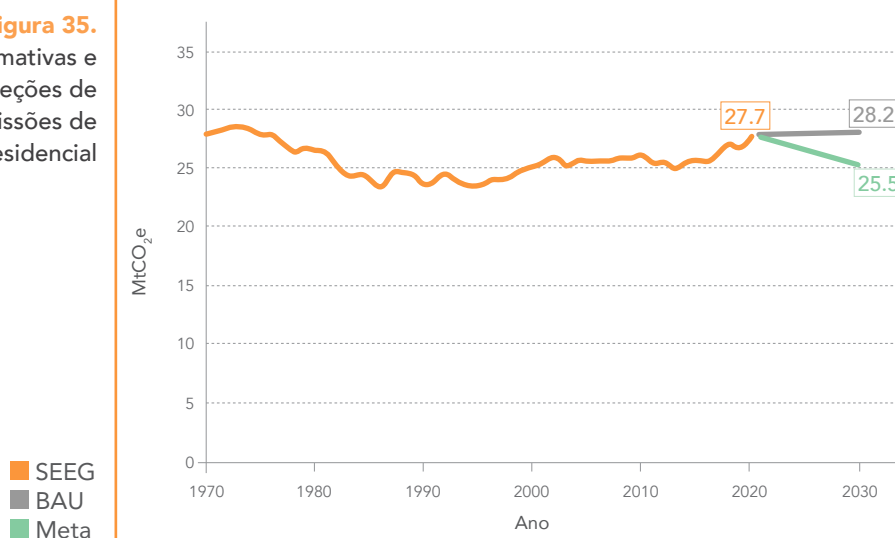
[ktCH ₄]	Consumo residencial de combustíveis		Fugitivas de P&G		Fugitivas do carvão mineral		Consumo industrial de combustíveis		Transporte		Consumo de lenha na agropecuária		Consumo de bagaço de cana na produção de álcool		Geração de energia elétrica		Outros		Total	
	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META	BAU	META
2020	286	286	116	116	42	42	34	34	28	28	23	23	18	18	11	11	14	14	572	572
2021	277	266	91	91	30	30	34	33	29	29	23	23	17	17	14	14	13	14	528	517
2022	271	247	113	113	38	38	34	34	30	30	23	23	17	17	13	13	14	15	553	529
2023	264	227	116	116	37	37	35	34	30	30	23	23	18	18	14	14	14	15	552	514
2024	258	207	127	127	37	37	36	35	31	31	24	24	19	19	14	14	15	15	560	508
2025	252	188	133	133	37	37	37	35	32	32	24	24	19	19	14	14	15	16	563	498
2026	246	168	144	133	38	38	38	36	32	32	24	24	20	20	15	15	15	16	572	482
2027	239	149	159	135	38	38	39	36	33	33	24	24	20	20	16	16	16	16	585	467
2028	234	129	172	132	20	20	40	37	34	34	24	24	21	21	17	17	16	16	577	430
2029	228	110	177	123	30	30	41	37	35	35	25	25	21	21	17	17	17	17	590	413
2030	222	90	181	111	36	36	42	38	36	36	25	25	22	22	18	18	17	17	597	391
Potencial	0		21		0		52		23		29		34		27		25		210	



A título de ilustração do fato de que a substituição da lenha (um biocombustível) por GLP (um combustível fóssil) leva à redução das emissões totais de GEE, apresenta-se na Figura 35 as emissões totais de GEE residencial nos cenários supracitados. Ou seja, a redução das emissões de metano decorrentes da

redução do consumo de lenha no cenário de atendimento ao Acordo do Metano não é compensada pelo aumento das emissões de CO₂ e metano decorrente do aumento do consumo de GLP. Apesar de parecer contraintuitivo, o que ocorre é uma redução líquida das emissões totais de GEE.

Figura 35.
Estimativas e projeções de emissões de GEE residencial



4.5. Meta agregada de todos os setores

Neste capítulo avaliou-se três cenários de emissões:

- (i) A **direção das emissões** de metano no Brasil até 2030 considerando as políticas atuais de mitigação no país (**BAU**);
- (ii) O **potencial de redução de emissões** de metano no Brasil num horizonte de longo prazo;
- (iii) Uma proposta de **meta de redução de emissões** alcançável pelo Brasil dentro do horizonte para 2030 de forma compatível com a meta do Acordo Global do Metano de redução de 30% das emissões em relação a 2020.

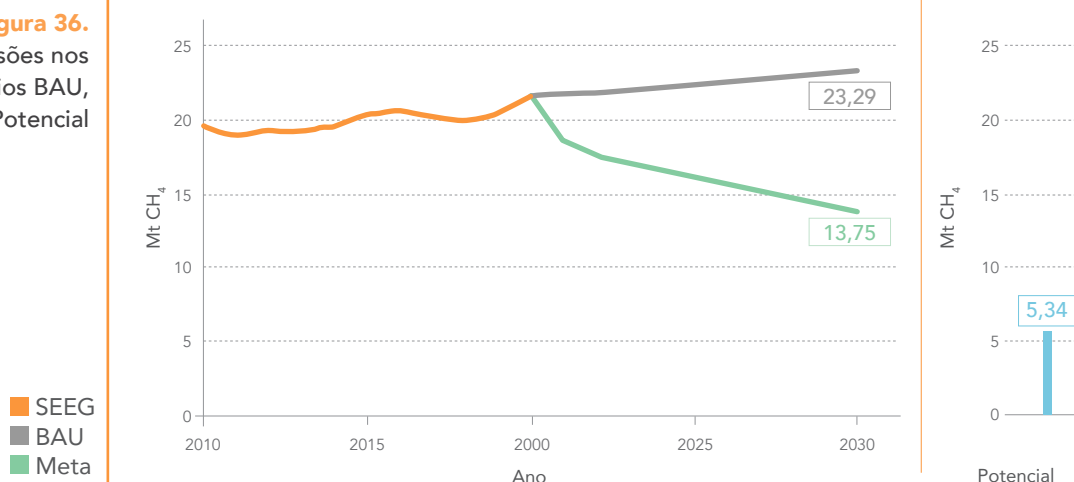
Tabela 18.

Emissões históricas e cenários para emissão de metano (2010-2030)

DADO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
HISTORICO	19.599.168	18.935.614	19.222.716	19.256.707	19.585.739	20.310.330	20.621.256	20.195.150	19.919.774	20.395.919	21.625.465
CENÁRIO	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
POTENCIAL		14.553.968	13.353.415	12.240.817	11.196.655	10.199.243	9.190.272	8.204.361	7.227.583	6.251.805	5.335.604
META		18.561.507	17.538.323	16.951.029	16.427.276	15.933.798	15.456.602	14.992.851	14.562.884	14.162.283	13.753.223
BAU		21.675.170	21.863.043	22.038.598	22.224.019	22.401.881	22.582.389	22.768.177	22.931.879	23.115.429	23.291.684



Figura 36.
Emissões nos
cenários BAU,
Meta e Potencial



Ao agregar os valores das análises de cada um dos 4 setores (agropecuária; mudanças de uso da terra e florestas; tratamento de resíduos; e energia¹⁸), obtemos para o **cenário BAU** uma emissão de 23,3 MtCH₄ em 2030 com um crescimento de 7% das emissões em relação aos 21,7 MtCH₄ de 2020 (Figura 33).

Já para o **Cenário Potencial de Redução** temos uma emissão de 5,3 MtCH₄ que representa uma redução de 75% das emissões em relação a 2020. Ou seja, com as tecnologias conhecidas não é possível zerar as emissões de metano. Seria necessário fazer uso de compensações com remoção de carbono equivalente para zerar emissões residuais.

Por fim, aplicando-se as melhores práticas e tecnologias existentes e possíveis de serem implementadas até 2030, obtém-se a emissão de 13,75 MtCH₄ em 2030, o que representa uma redução de 36,4% em relação às emissões de 2020. Isso equivale a uma redução de 180 MtCO₂e comparando 2020 e 2030.

Assim, propomos que o Brasil adote uma **meta de redução de 36% das suas emissões de metano até 2030 quando comparado com 2020**, sendo essa uma contribuição significativa do país para meta do Compromisso Global do Metano de redução de 30% das emissões de metano até 2030.

36%

é a meta de
redução nas
emissões de
metano
proposta pelo
OC para 2030

¹⁸ O setor de Processos Industriais e Uso de Produto não foi tratado neste exercício, devido à sua relativa baixa contribuição nas emissões nacionais de metano (0,22% em 2020, de acordo com os dados do SEEG).



5 Considerações Finais

O metano representa cerca de 16% das emissões globais de gases de efeito estufa quando convertidas para CO₂e (UNEP, 2021). É um gás de curta permanência na atmosfera (decaimento de menos de 20 anos) e, portanto, todo esforço para reduzir suas emissões pode ter um impacto mais rápido na temperatura global, aumentando a janela de oportunidade de que a humanidade dispõe para manter ao alcance a meta do Acordo de Paris de estabilizar o aquecimento global em 1,5°C em relação à média pré-industrial.

Em 2021 o Brasil aderiu ao Compromisso Global do Metano juntamente com 122 nações que se comprometem a buscar uma redução de 30% das emissões globais desse gás até 2030, em relação a 2020.

O Brasil é o quinto maior emissor de metano do mundo - depois de China, EUA, Rússia e Índia -, sendo sua principal fonte de emissão a pecuária (em especial a fermentação entérica), seguida pelo tratamento de resíduos e pelas queimadas.

Avaliamos o caminho das emissões nas condições atuais de políticas públicas que resultam em um crescimento de 7% das emissões de 2020 até 2030. Avaliamos também o potencial de redução hipotético das emissões se aplicadas todas as tecnologias e melhores práticas conhecidas em toda sua plenitude e concluímos que as emissões poderiam ser reduzidas em 75% com relação ao nível de 2020. Por fim, identificamos a possibilidade de reduzir as emissões em 36,4% até 2030, em relação a 2020, aplicando-se as tecnologias e boas práticas existentes.

O Brasil pode contribuir com a transição para um mundo com baixas emissões de metano com uma meta ao mesmo tempo ousada e factível: 36% de redução de emissões de metano até 2030 comparado aos níveis de 2020.

Para tanto é necessário, entre outras práticas, zerar o desmatamento ilegal e o fogo associado a ele, reduzir o uso de lenha para cocção, controlar as emissões fugitivas da indústria de petróleo e gás, recuperar pelo menos 50% de todo metano gerado nos aterros sanitários, ampliar a recuperação de metano do tratamento de resíduos animais, alcançar 30% de terminação intensiva do rebanho bovino de corte, conversão de 75% do cultivo de arroz para preparo antecipado e cortar pela metade a prática de queima da palha de cana-de-açúcar ainda existente.

Essa meta pode ser alcançada com políticas regulatórias, de capacitação e de incentivos econômicos nos setores público e privado.

75%

é o potencial de redução até 2030 empregando todas as tecnologias conhecidas em escala

Agradecimentos

A Clárisse Lins e Guilherme Ferreira da Catavento Consultoria pelo compartilhamento de conhecimento acerca da indústria de petróleo e gás natural. Para o setor de mudanças de uso da terra e florestas, agradecemos a Eduardo Wagner pelo compartilhamento de conhecimento sobre reservatórios e a Edriano Souza pela ajuda no levantamento de estudos bibliográficos sobre emissões de metano em reservatórios e em áreas úmidas.

Para os setores de agropecuária, agradecemos especiais pela atenção e tempo disponibilizado a Walkyria Bueno Scivittaro e a Leidiane Ferronato Mariani, pelos esclarecimentos sobre o cultivo de arroz irrigado e tratamento de dejetos animais, respectivamente. Assim como para o Alexandre Berndt, Fábio Luiz Buranelo Toral e Guilherme Francklin de Souza Congio pelas dúvidas tiradas e conhecimentos compartilhados sobre mitigação de emissões na pecuária.

Referências Bibliográficas

- ABCON SINDCON, Associação e Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto. Agenda legislativa dos operadores privados de saneamento. 2022. Disponível em: <https://abconsindcon.com.br/wp-content/uploads/2022/04/AgendaLegislativa2022-final.pdf>
- Abril, G., et al. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year-old tropical reservoir (Petit-Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles* 19, GB4007.
- ANJOS, Elismar dos. ADITIVOS NA TERMINAÇÃO INTENSIVA DE BOVINOS DE CORTE A PASTO. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2019. Disponível em: <https://cms.ufmt.br/files/galleries/64/DISSERTA%C3%87%C3%95ES/2019/ELIS-MAR%20DOS%20ANJOS.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. 2017. RESOLUÇÃO N° 685, DE 29 DE JUNHO DE 2017. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-685-2017-estabelece-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-e-a-especificacao-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional>
- ANUALPEC. Anuário da Pecuária Brasileira. São Paulo: FNP, 2021. http://www.mt.gov.br/rss/-/asset_publisher/Hf4xlehM0lwr/content/id/15995340
- ARNDT, Claudia; HRISTOV, Alexander N.; PRICE, William J.; et al. Strategies to mitigate enteric methane emissions by ruminants - a way to approach the 2.0°C target. *agriRxiv*, v. 2021, p. 20210085288, 2021. Disponível em: <http://www.cabidigitalibrary.org/doi/10.31220/agriRxiv.2021.00040>. Acesso em: 12 set. 2022.
- BARBOSA, Fabiano Alvim et al. Cenários para a pecuária de corte amazônica. Belo Horizonte: Editora Igc / Ufmg, 2015. 154 p. Disponível em: https://csr.ufmg.br/pecuaria/wp-content/uploads/2015/03/relatorio_cenarios_para_pecuaria_corte_amazonica.pdf. Acesso em: 12 set. 2022.
- Basso, L.S., Marani, L., Gatti, L.V. et al. 2021. Amazon methane budget derived from multi-year airborne observations highlights regional variations in emissions. *Commun Earth Environ* 2, 246.
- BERNDT, A. et al. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: a perspective from australia and brazil. *Animal*, [S.L.], v. 7, p. 363-372, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731113000670>.

- BERNDT, Alexandre; ROMERO SOLÓRZANO, L. A.; SAKAMOTO, Leandro Sannomiya. Pecuária de corte frente à emissão de gases de efeito estufa e estratégias diretas e indiretas para mitigar a emissão de metano. In: Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO DE NUTRIÇÃO DE RUMINANTES, 6., nutrição de precisão para sistemas intensivos de produção de carne: alto desempenho e baixo impacto ambiental: anais; BRAZILIAN RUMINANT NUTRITION CONFERENCE, 4., 2013, Botucatu. Precision nutrition for intensive beef production systems: high performance and low environmental impact: Proceedings. Botucatu: UNESP, 2013., 2013.
- Brandão et al. 2019. Conjunctive use of in situ gas sampling and chromatography with geospatial analysis to estimate greenhouse gas emissions of a large Amazonian hydroelectric reservoir. *Science of The Total Environment* 650, 394-407
- Brasil, Lei nº 14.026/2020 – Atualização do marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm
- CARDOSO, Abmael S. et al. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, [S.L.], v. 143, p. 86-96, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2015.12.007>.
- CAMARGO, Estefânia Silva. Potencial de práticas agrícolas em mitigar as emissões de gases de efeito estufa na cultura do arroz irrigado. 2015. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/128133>. Acesso em: 05 abr. 2022.
- CEPEA (Brasil). PECUÁRIA/CEPEA: Propriedades que investem em genética têm vantagens econômica, ambiental e social sobre “fazendas típicas”. Piracicaba, 2015. 2 p. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/busca.aspx?busca=GEN%C3%89TICA>. Acesso em: 17 mar. 2022
- Climate & Clean Air Coalition. “Short-Lived Climate Pollutant Solutions”. Acessado 16 de março de 2022. <https://www.ccacoalition.org/en/content/short-lived-climate-pollutant-solutions>.
- CNA (Brasil). Em 10 anos, produtividade média da pecuária nacional cresce mais de 22%. 38. ed. Brasília, 2018. 5 p. Disponível em: https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/38-ativocorte_0.99487700%201537805664.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Séries Históricas, 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>
- CONGIO, Guilherme Francklin de Souza et al. Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: a meta-analysis. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 312, p. 127693, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621019119#!>. Acesso em: 21 jun. 2022



- COSTA JUNIOR, C. et al. Brazilian beef cattle feedlot manure management: a country survey. *Journal Of Animal Science*, [S.L.], v. 91, n. 4, p. 1811-1818, 1 abr. 2013. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5603>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article-abstract/91/4/1811/4717048?redirectedFrom=fulltext>
- De Faria, FAM, et al. 2015. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. *Environ. Res. Lett.*, 10, 124019.
- Deemer E.R et al. 2016. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience* 66, 949-964.
- Demarty, M, Bastien, J. 2011. GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy* 39, 4197–4206
- Dos Santos, MA et al. 2017. Estimates of GHG emissions by hydroelectric reservoirs: The Brazilian case. *Energy*, 133, 99-107.
- EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Dados conjunturais da produção de arroz (*Oryza sativa* L.) no Brasil (1986 a 2020): área, produção e rendimento. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- EPA. United States Environmental Protection Agency. 2022. Biogas Toolkit. Disponível em: <https://www.epa.gov/agstar/biogas-toolkit>
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency's (U.S. EPA's) Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases: 1990–2030 report. www.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/EPA_Global_NonCO2_Projections_Dec2012.pdf
- Fearnside, P.M., 2013. Climate change and the Amazon: tropical dams emit greenhouse gases. *ReVista Harvard Rev. Latin Am.* 12 (2) 30–31.
- Fearnside, P.M. 2015 Emissions from tropical hydropower and the IPCC. *Environmental Science & Policy*, 50, 225–239.
- Fearnside PM. 2016. Greenhouse gas emissions from Brazil's Amazonian hydroelectric dams. *Environ. Res. Lett.* 11, 011002.
- FIESP (Brasil). Outlook FIESP: projeções para o agronegócio brasileiro 2029. São Paulo: Fiesp, 2020. 84 p. Disponível em: <https://outlookdeagro.azurewebsites.net/OutLookDeagro/pt-BR>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- France JLet al. 2021. $\delta^{13}\text{C}$ methane source signatures from tropical wetland and rice field emissions. *Phil. Trans. R. Soc. A* 380: 20200449.
- Gauci V, Figueiredo V, Gedney N, Pangala SR, Stauffer T, Weedon GP, Enrich-Prast A. 2021. Non-flooded riparian Amazon trees are a regionally significant methane source. *Phil. Trans. R. Soc. A* 380: 20200446.
- Hertwich EG. 2013. Addressing Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Hydropower in LCA. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 9604–9611



- IBGE (Brasil). Pesquisa da Pecuária Municipal: tabela 3939 - efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho. Tabela 3939 - Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho. 2022a. SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>. Acesso em: 17 mar. 2022.
- IBGE (Brasil). Produção Agrícola Municipal: tabela 5457 - área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. 2022b. SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- IEA (Brasil). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista: ações visando à preservação ambiental. 2012. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=12390>. Acesso em: 11 mar. 2022.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Editora: IGES, Japão.
- IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Editora: IPCC, Suíça.
- Kemenes, A., Forsberg, B.R., Melack, J.M. 2007. Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophys. Res. Lett.* 34, L12809.
- Koppmann, R., von Czapiewski, K., and Reid, J. S. 2005. A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 10455–10516.
- MACHADO, Fernanda Samarini et al. Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2011. 92 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/895247/1/Doc147Emissoesmetano.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- MACIEL, Isabella Cristina de Faria et al. Could the breed composition improve performance and change the enteric methane emissions from beef cattle in a tropical intensive production system? *Plos One*, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1-15, 26 jul. 2019. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0220247>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0220247>. Acesso em: 28 jul. 2022.
- MARTIN, C. et al. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*, [S.L.], v. 4, n. 3, p. 351-365, 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109990620>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731109990620>. Acesso em: 10 mar. 2022.



- MAPA. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa emissão de carbono). Brasília, 2012. 176 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2022.
- MAPA. PLANO SETORIAL PARA ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA E BAIXA EMISSÃO DE CARBONO NA AGROPECUÁRIA 2020-2030: plano operacional. Brasília, 2021. 136 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- MAPA (Brasil). PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO: brasil 2020/21 a 2030/31 projeções de longo prazo. Brasília: Mapa, 2021b. 102 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2020-2021-a-2030-2031.pdf/view>. Acesso em: 24 jun. 2022.
- MAPA. Sidney Almeida Filgueira de Medeiros. Mapa. NOTA TÉCNICA: Diagnóstico da expansão da adoção da tecnologia de Tratamento de Dejetos Animais (TDA) no território brasileiro entre 2010 e 2019. Brasília, 2019. 50 p.
- MAPBIOMAS (Brasil). Qualidade de pastagem. 2022. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- MAPBIOMAS 2021. Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2020. São Paulo, Brasil, 93 p.
- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório síntese dos relatórios de referência subsetoriais setor agropecuária versão de. Brasília, 2020a. 9 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 11 mar. 2022.
- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório de referência setor agropecuária subsetor fermentação entérica. Brasília, 2020b. 143 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 09 mar. 2022.
- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório de referência setor agropecuária subsetor manejo de dejetos. Brasília, 2020c. 142 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 09 mar. 2022.
- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório de referência setor agropecuária subsetor cultivo de arroz. Brasília, 2020d. 102 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 09 mar. 2022.



- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório de referência setor agropecuária subsetor queima de resíduos agrícolas. Brasília, 2020e. 114 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 09 mar. 2022.
- MCTI (Brasil). QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA: relatório de referência setor mudanças de uso da terra. Brasília, 2020f. 315 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- MDR (Brasil). Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Brasília, 2019. 240 p. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab/Versao_Conselhos_Resoluo_Alta_Capa_Atualizada.pdf. Acesso em: mar. 2022
- MMA (Brasil). Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES. Brasília, 2019. 187 p. Disponível em: <http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wp-content/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Consulta-P%C3%BAblica.pdf>. Acesso em: mar. 2022
- MMA (Brasil). Programa Nacional Metano Zero. Brasília, 2022. 10 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/ProgramaMetanoZero.pdf>. Acesso em: jun. 2022
- MME (Brasil). Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Nota Técnica EPE DEA 016/2021, “Consumo de Lenha e Carvão Vegetal, Setor Residencial Brasil”. 2021, 138 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/Nota%20T%C3%A9cnica%20Consumo%20de%20lenhaCV%20-%20Residencial%20final%202021.pdf>. Acesso em: ago. 2022
- Moore, T.R. and Knowles, R. 1989. The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69 (1): p. 33-38.
- Myhre Get al. 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: T F Stocker et al (eds) *Contribution of Working Group 1st to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press) pp 661–740.
- OGCI. “OGCI Action & Engagement | Aiming for Zero Methane Emissions Initiative”. OGCI (blog), 4 de março de 2022. <https://www.ogci.com/action-and-engagement/aiming-for-zero-methane-emissions-initiative/>.
- Pangala, SR, Enrich-Prast, A, Basso, LS et al. 2017. Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 552. pp. 230-234.
- Petrobras. 2022. “Caderno de Mudança do Clima da Petrobras”. Disponível em: <https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/25fdf098-34f5-4608-b7fa-17d60b-2de47d/d7092e4e-9830-c6b1-ff36-62247b97a17a?origin=1>.



- PICKERING, N.K. et al. Animal board invited review: genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 1431-1440, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115000968>.
- PINTO, Talita Priscila. PRODUTIVIDADE E MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE PECUÁRIA BRASILEIRO. 2019. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Economia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.
- Project Drawdown. "Clean Cooking @ProjectDrawdown #ClimateSolutions", 7 de fevereiro de 2020. <https://drawdown.org/solutions/clean-cooking>.
- Rosa, L.P., dos Santos, M.A., Matvienko, B., dos Santos, E.O., Sikar, E., 2004. Greenhouse gases emissions by hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climate Change* 66 (1-2), 9-21.
- Sauniois et al. 2020. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561-1623
- Schumacher V., et al. 2022. Characteristics of lightning-caused wildfires in central Brazil in relation to cloud-ground and dry lightning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 312, 108723
- SENE, Guilherme Acácio de et al. Práticas estratégicas com vistas à mitigação dos gases do efeito estufa na produção de bovinos a pasto. In: RODRIGUÊS, Paulo Henrique Mazza. *Novos Desafios da Pesquisa em Nutrição e Produção Animal*. São Paulo: Editora 5D, 2019. p. 268-294. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337325398_Novos_Desafios_da_Pesquisa_em_Nutricao_e_Producao_Animal/link/5dd2830ea6fdcc7e138a8e46/download. Acesso em: 25 mar. 2022.
- Steinhurst, W., Knight, P., Schultz, M. 2012. *Hydropower Greenhouse Gas Emissions: State of the Research*. Synapse Energy Economics, Inc., Cambridge, Massachusetts, USA 24 pp.
- SUBHARAT, Supatsak et al. Vaccination of cattle with a methanogen protein produces specific antibodies in the saliva which are stable in the rumen. *Veterinary Immunology And Immunopathology*, [S.L.], v. 164, n. 3-4, p. 201-207, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vetimm.2015.02.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165242715000513?via%3Dihub>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- Teh, Y. A., Murphy, W. A., Berrio, J.-C., Boom, A., and Page, S. E. 2017. Seasonal variability in methane and nitrous oxide fluxes from tropical peatlands in the western Amazon basin, *Biogeosciences*, 14, 3669-3683.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME AND CLIMATE AND CLEAN AIR COALITION (Kenya). United Nations Environment Programme. *GLOBAL METHANE ASSESSMENT: benefits and costs of mitigating methane emissions*. Nairobi, 2021. 173 p. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>. Acesso em: 11 abr. 2022.



- VIJN, Sandra et al. Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions From Cattle. *Frontiers In Veterinary Science*, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-9, 23 dez. 2020. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>. Acesso em: 09 mar. 2022.
- Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo D.J. and Dokken D.J. (Eds.) 2000. *Special Report of the IPCC on Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. Cambridge University Press, UK. pp 375.
- Winton RS, Flanagan N, Richardson CJ. 2017. Neotropical peatland methane emissions along a vegetation and biogeochemical gradient. *PLoS ONE* 12(10): e0187019.
- ZSCHORNACK, Tiago. Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo. 2011. 102 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/72102>. Acesso em: 05 abr. 2022.

