

Brasília, DF / Novembro, 2024

Biodigestor para pequenos estabelecimentos agropecuários

Potencial de geração de renda e impacto ambiental

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL



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

e-ISSN 2177-4439

Documentos 55

Novembro, 2024

**Biodigestor para pequenos
estabelecimentos agropecuários**
Potencial de geração de renda e impacto ambiental

*Itânia Pinheiro Soares
Priscila Seixas Sabaini
Rosana do Carmo Nascimento Guiducci
Rossano Gambetta
Sílvia Belém Gonçalves*

Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2024

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770 901, Brasília, DF
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente
Juliana Evangelista da Silva Rocha

Secretária-executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
Alexandre Nunes Cardoso
Diogo Keiji Nakai
João Ricardo Moreira de Almeida
Leonardo Fonseca Valadares
Livia Teixeira Duarte Brandão
Priscila Seixas Sabaini
Sílvia Belém Gonçalves

Edição executiva e revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Galon Arruda (CRB-1/2133)

Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio

Diagramação
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Foto da capa
Itânia Pinheiro Soares

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agroenergia

Biodigestor para pequenos estabelecimentos agropecuários : potencial de geração
de renda e impacto ambiental / Itânia Pinheiro Soares ... [et al.]. - Brasília, DF :
Embrapa Agroenergia, 2024.

PDF (19 p.). - (Documentos / Embrapa Agroenergia, e-ISSN 2177-4439 ; 55).

1. Biodigestor. 2. Biogás. 3. Energia. 4. Impacto ambiental. 5. Impacto
econômico. 6. Propriedade rural. I. Soares, Itânia Pinheiro. II. Sabaini, Priscila
Seixas. III. Guiducci, Rosana do Carmo Nascimento. IV. Gambetta, Rossano.
V. Gonçalves, Sílvia Belém. VI. Série.

CDD 665.776

Autores

Itânia Pinheiro Soares

Química, doutora em Química,
pesquisadora da Embrapa Agroenergia,
Brasília, DF

Priscila Seixas Sabaini

Engenheira de alimentos, mestre em
Ciência de Alimentos, analista da Embrapa
Agroenergia, Brasília, DF

Rosana do Carmo Nascimento Guiducci

Economista, doutora em Economia
Aplicada, pesquisadora da Embrapa
Agroenergia, Brasília, DF

Rossano Gambetta

Engenheiro químico, doutor em Engenharia
Química, pesquisador da Embrapa
Agroenergia, Brasília, DF

Sílvia Belém Gonçalves

Engenheira química, doutora em
Engenharia Química, pesquisadora da
Embrapa Agroenergia, Brasília, DF

Apresentação

O biogás, uma fonte de energia renovável proveniente da decomposição de matéria orgânica, tem se destacado como uma solução promissora de energia que pode ser aplicada a diversos segmentos. A produção desse tipo de gás envolve a fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos, como resíduos agroindustriais, agrícolas, esterco e restos de alimentos, em biodigestores. Esse processo não só gera biogás, mas também produz o digestato (material residual após a digestão), que possui baixa carga orgânica e nutrientes, possibilitando a utilização desse resíduo como biofertilizante, que pode ser aplicado no solo. Para pequenas propriedades rurais, o biogás oferece uma alternativa viável às fontes de energia convencionais, como a eletricidade e o gás de cozinha.

Outro benefício significativo do biogás é a contribuição para a gestão de resíduos. Pequenos produtores rurais frequentemente enfrentam desafios relacionados ao manejo de resíduos orgânicos, que

podem causar impactos ambientais se não forem adequadamente tratados. A utilização desses resíduos para produção de biogás auxilia no seu manejo, ao convertê-los em energia e biofertilizante, reduzindo o impacto ambiental potencial associado ao descarte.

Embora as tecnologias disponíveis para pequenos sistemas de biodigestão sejam ainda escassas, existe um grande potencial de aplicação em propriedades rurais de pequeno porte. A utilização do biogás pode representar uma forma eficiente de reduzir custos energéticos e promover práticas agrícolas mais sustentáveis.

Este trabalho faz uma avaliação do potencial de aplicação da biodigestão para pequenas propriedades rurais, considerando impactos econômicos e ambientais em alguns cenários, tomando como base os dados coletados em um sistema instalado pela Embrapa Agroenergia, em uma propriedade rural no município de Luziânia, no estado de Goiás.

Alexandre Alonso Alves
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

Sumário

Introdução	9
Capacidade produtiva de biogás no Brasil	10
Potencial do setor agropecuário para produção de biogás	11
Desafios para a biodigestão em pequena escala	12
Implementação de biodigestor em pequena propriedade	12
Uso do biogás para cocção de alimentos na propriedade	12
Análise econômica e ambiental da produção de biogás e biofertilizante com base no biodigestor instalado na propriedade agropecuária familiar	12
Aspectos metodológicos	12
Potencial de uso do digestato biofertilizante	13
Impactos econômicos e ambientais em nível de propriedade	14
Potencial de produção de biogás e biofertilizante em estabelecimentos agropecuários de pequeno porte no Brasil: impactos econômico e ambiental	15
Potencial de produção e impactos econômicos	15
Impactos ambientais	16
Conclusão	16
Referências	17

Introdução

O biogás propriamente dito foi identificado por volta de 1667, pelo cientista Thomas Shirley, como um gás inflamável encontrado em áreas pantanosas. Cerca de um século depois, o metano foi identificado, por Alessandro Volta, como o componente do biogás responsável pela inflamabilidade de gás do pântano. Louis Pasteur e Ulysses Gaumon, no século XIX, realizaram o primeiro experimento de biodigestão, vislumbrando que a decomposição da matéria orgânica em condições controladas poderia servir como fonte de calor e iluminação (Centro Internacional de Energias Renováveis, 2022). A decomposição da matéria orgânica é um processo natural, que ocorre na presença de oxigênio (condição aeróbia) e na sua ausência (condição anaeróbia), pela ação de microrganismos que buscam alimento nesses materiais. Esse processo, quando ocorre em condições anaeróbias, dá origem ao biogás, composto principalmente por metano e gás carbônico. Quando realizado em condições controladas, o processo de biodigestão pode ser otimizado para aumentar a produção de metano, e este gás produzido pode ser utilizado na geração de calor e energia elétrica. Se purificado, ele pode ser utilizado como combustível veicular (biometano). Desse processo, também é gerada uma fração líquida, o digestato, material que passou pela biodigestão, e que apresenta nutrientes e carga orgânica reduzida, com potencial de utilização como biofertilizante. Com efeito, o processo de biodigestão é uma forma ambientalmente correta de destinar resíduos orgânicos e ao mesmo tempo agregar valor a esses resíduos, gerando o biogás e o digestato.

O processo de biodigestão pode ser aplicado em pequena escala e em grande escala. É possível ser feito a partir de resíduos de alguns poucos animais (suínos ou bovinos), chegando até a milhares de animais em grandes propriedades, e podem também ser agregados resíduos da agroindústria ou biomassa vegetal, residual ou dedicada.

Cabe salientar que o emprego desse tipo de tecnologia vai de encontro com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). A adoção

da biodigestão tem vários impactos na sociedade (Figura 1), por exemplo, geração de empregos (ODS 1 e 2); aumento na sustentabilidade, sobretudo nos aspectos econômico e ambiental das propriedades, o que impacta diretamente na meta de fome zero. Já o retorno do digestato como fertilizante para o campo tem impacto direto na sustentabilidade da produção agrícola. A disposição adequada de resíduos traz benefícios para a saúde e o bem-estar das comunidades circundantes (ODS 3), assim como contribui para a preservação dos corpos hídricos (ODS 6). Além disso, o uso de biocombustíveis está associado à redução da emissão de gases nocivos para a saúde, normalmente associados com o uso de combustíveis fósseis. A geração de energia limpa é um dos objetos do ODS 7. Os ODS 8 e 9 também são contemplados, pela geração de empregos e pelo crescimento econômico e pelo desenvolvimento da indústria, inovação e infraestrutura. Os ODS 11 e 12, que estão ligados, respectivamente, a cidades e comunidades sustentáveis e a consumo e produção responsáveis, também são indiretamente contemplados. Finalmente, a redução de emissões de metano, associadas à degradação anaeróbia de resíduos orgânicos, e a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis são ações efetivas contra a mudança global do clima (ODS 13).



Figura 1. Os ODS e o seu relacionamento com uso do biogás.

Fonte: Adaptado de Paraná, Conexão Ambiental (2024).

Capacidade produtiva de biogás no Brasil

O biogás é uma das fontes de energia renovável mais promissoras, graças aos múltiplos usos e à diversidade de substratos que podem ser utilizados na produção. Com efeito, ele vem se expandindo em diversos países, a exemplo do Brasil, nos últimos anos. O principal uso do biogás tem sido a conversão para produção de eletricidade. A capacidade mundial de geração de energia elétrica a partir de biogás passou de 9.634 MW, em 2010, para 21.512 MW, em 2022 (International Renewable Energy Agency, 2023), um crescimento de 123,3% em uma década.

Embora o Brasil configure entre os sete países que possuem 73,8% das plantas de biogás para produção de energia elétrica, responde apenas por 2,1% da capacidade instalada mundial (International Renewable Energy Agency, 2023). Em 2024, espera-se um crescimento de 1 GW na capacidade instalada de cogeração no Brasil, alavancada por usinas movidas a biomassa, que percebem cada vez mais o biogás e o biometano como um quarto produto, além do açúcar, do etanol e da bioeletricidade (Capacidade, 2024).

Nesse contexto de transição energética e aumento da capacidade de produção de bioenergia, sobretudo biogás, setores como o agropecuário,

que possui enorme potencial de geração de biomassa residual e, portanto, de produção de biogás e derivados, ainda subaproveitam esses produtos. Em 2023, havia no Brasil 1.365 plantas de biogás cadastradas no Biogasmap (ferramenta criada pelo Centro Internacional de Energias Renováveis (Cibiogás) com dados atualizados de plantas de biogás no País), produzindo 4,14 bilhões de Nm³/ano. O crescimento da capacidade instalada, nos últimos 5 anos, foi de 21% ao ano. Em 2023, o uso de substrato de origem da agropecuária na produção de biogás foi de 17%, enquanto a indústria respondeu por 20% e esgotos urbanos geraram 63% da matéria-prima (Centro Internacional de Energias Renováveis, 2024). A produção é altamente concentrada em plantas de grande porte, com produção anual acima de 5 milhões de Nm³, localizadas principalmente nas regiões Sul e Sudeste e em parte do Centro-Oeste. Os estados do Rio de Janeiro, Pernambuco e São Paulo se destacam com as maiores médias de produção de biogás (Figura 2). As plantas de grande porte respondem por 8% do total de instalações e produzem 83% do biogás. As plantas de pequeno porte (com produção de até 1 milhão de Nm³/ano) respondem por 78% do total de plantas de biogás instaladas e por 7% da produção, enquanto as de médio porte (com produção de 1 milhão a 5 milhões de Nm³/ano) são 15% do total e respondem por 10% da produção (Centro Internacional de Energias Renováveis, 2023).

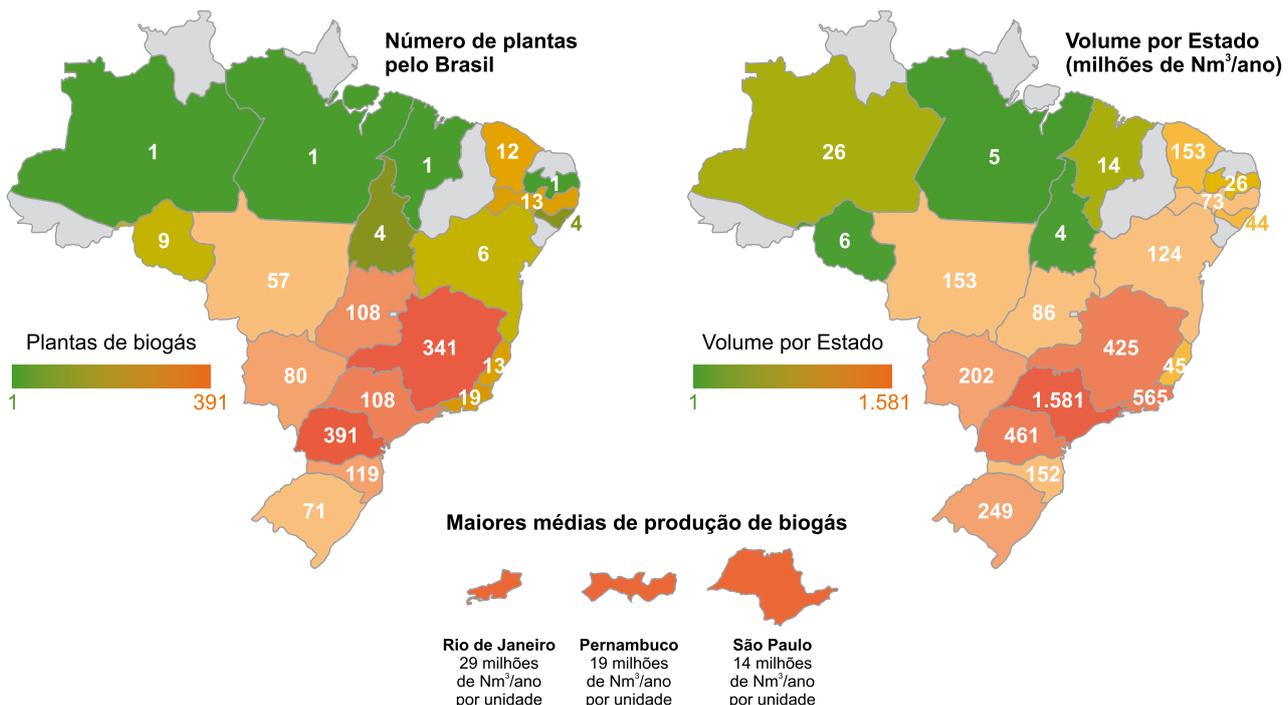


Figura 2. Distribuição de plantas e do volume de produção de biogás no território nacional, em 2023.

Fonte: Centro Internacional de Energias Renováveis (2024).

Potencial do setor agropecuário para produção de biogás

O uso de apenas 17% de substrato de origem agropecuária na produção nacional de biogás demonstra que há um grande espaço para o setor agropecuário produzir, consumir ou mesmo comercializar biogás e derivados. Particularmente, a cadeia da bovinocultura pode destinar os dejetos bovinos para a produção de biogás e biofertilizante, com impactos econômicos em redução de custos de produção e aumento de renda, além de impactos ambientais positivos, pela redução de emissão de gases de efeito estufa.

O Brasil possui o maior rebanho bovino do planeta, da ordem de 224,6 milhões de cabeças (FAO, 2023), distribuído em todo o território nacional. Há uma elevada concentração de estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio porte, contendo de uma até 100 cabeças de gado, como indicado na Figura 3. De um total de 1,86 milhão de estabelecimentos com efetivo bovino no País, 1,59 milhão (85,47%) está na faixa de uma até 100 cabeças de bovinos.

Em especial, chama a atenção o número de estabelecimentos agropecuários com 11 até 50 cabeças de gado, pois constituem o público ideal para utilizar biodigestor de pequena escala, adaptado e dimensionado para processar resíduos da bovinocultura, com fins de produção de biogás e

biofertilizante. Essa faixa responde por 42,6% do número de estabelecimentos com bovinos no Brasil, totalizando 792.041 propriedades.

Esse contingente de produtores poderia se beneficiar da produção e do consumo de biogás e biofertilizante, com fins de autonomia energética e redução de custos nas propriedades, em uma lógica de economia circular. Segundo Milanez et al. (2018), converter a biomassa residual da atividade agropecuária (resíduos agrícolas e dejetos de animais) em energia e fertilizante é o elo fundamental para fechar os ciclos da reciclagem dos nutrientes e do carbono, evitando emissões de gases do efeito estufa (GEE). Essa é uma forma eficiente de promover economia circular com os resíduos orgânicos e de proporcionar a redução da emissão de GEE. Mas, apesar de o uso de dejetos de animais e restos de culturas ser viável economicamente para produzir energia e biofertilizante, torna-se necessário um planejamento adequado por parte do produtor, para uma gestão eficiente e eficaz da produção e um fornecimento adequado de biogás e digestato à propriedade.

Nesse contexto, e considerando o elevado contingente de propriedades agropecuárias de pequeno porte, surgem questões. Qual o potencial desse segmento para contribuir com a redução de emissões de GEE, por meio da geração de energia renovável em pequena escala, destinada ao consumo próprio? Qual o impacto econômico e ambiental dessa produção (biogás e biofertilizante) em um cenário de adoção abrangente?

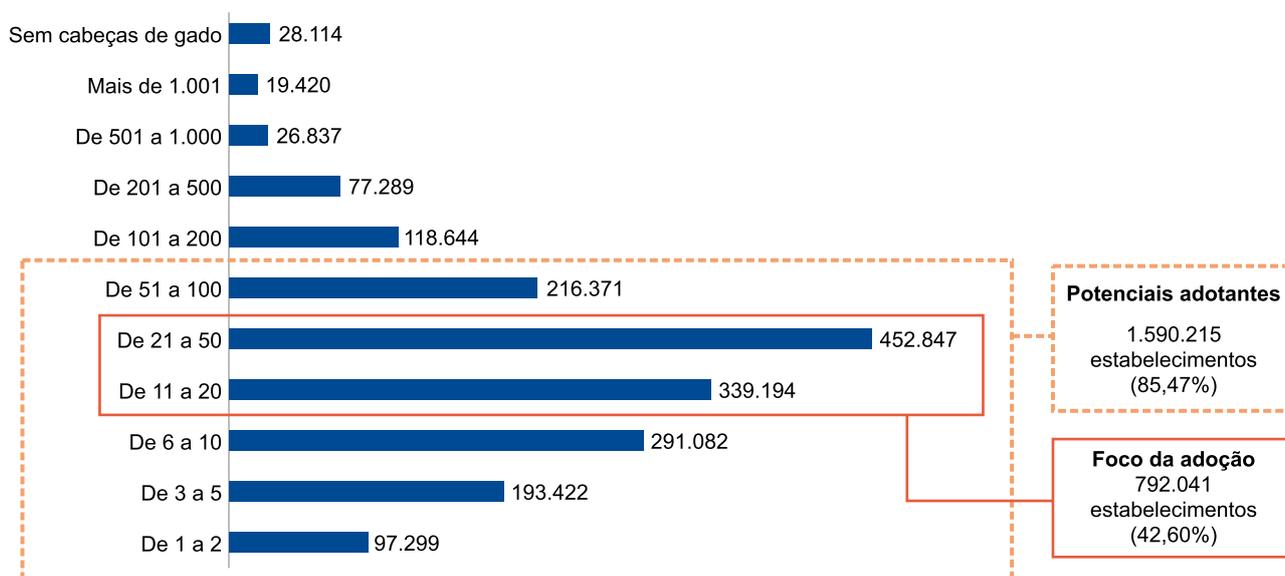


Figura 3. Número de estabelecimentos por efetivo bovino no Brasil.

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados do Censo Agropecuário 2017 (IBGE, 2017).

Desafios para a biodigestão em pequena escala

Embora tenha aumentado consideravelmente o número de plantas de biogás pelo País, além dos investimentos feitos no setor, as tecnologias disponíveis são para sistemas que, mesmo em pequena escala, têm produção suficiente para que o biogás possa alimentar geradores para produção de energia elétrica. As tecnologias disponíveis agregam vários sistemas de controle, como regulagem de temperatura e agitação, sem falar de tecnologias para alimentação e tecnologias de purificação do gás. Tais dispositivos são importantes, potencializam a produção do biogás, mas, em contrapartida, adicionam custos ao processo. Quando se fala de pequenos sistemas cuja finalidade é basicamente a utilização como fonte térmica, em substituição ao gás liquefeito de petróleo (GLP), há uma escassez de oferta de biodigestores, o que dificulta a expansão da produção de biogás em pequenas propriedades. Considerando apenas a substituição do GLP pelo biogás, embora importante, os gastos em automação dos sistemas não se justificam. Com a limitação de tecnologias disponíveis, tem-se recorrido aos biodigestores construídos em alvenaria. Isso depende também do conhecimento de quem pretende executar a obra. Ainda que os biodigestores devam ser construídos de forma a possibilitar uma fácil operação, apresentando custos moderados, é importante que seja dada a devida atenção à qualidade dos materiais que os compõem, evitando problemas que podem surgir durante a utilização, como vazamentos e danos, resultando em menor vida útil dos sistemas.

Assim sendo, uma oportunidade para o setor é disponibilizar pequenos sistemas, que se adaptam à realidade de pequenas propriedades rurais, que sejam acessíveis financeiramente, de fácil instalação e operação e que tenham durabilidade.

Implementação de biodigestor em pequena propriedade

Como parte de um projeto desenvolvido pela Embrapa Agroenergia, em parceria com a Cooperativa Mista da Agricultura Familiar do Meio Ambiente e da

Cultura do Brasil (Coopindaiá), foi implementado um sistema de biodigestão de 5 mil litros, em uma propriedade rural dedicada à atividade de bovinocultura leiteira, na área rural do município de Luziânia, GO, com o objetivo de utilizar dejetos produzidos na propriedade para geração de biogás e utilização deste para substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP). A propriedade relacionada ao estudo se dedica principalmente à criação de bovinos leiteiros.

Uso do biogás para cocção de alimentos na propriedade

O biodigestor instalado na propriedade rural foi monitorado por três meses. Por mês, o produtor consumiu por volta de 28,5 m³ de biogás. Segundo Silva (2019), um botijão de gás (GLP, 13 kg) equivale a 28,5 m³ de biogás, e o custo médio de um botijão no estado de Goiás é R\$ 120,00. Logo, estima-se que o produtor economizou, aproximadamente, um botijão de GLP por mês, o que resultaria em uma receita de R\$ 120,00 por mês. Portanto, nota-se que a digestão anaeróbia pode ser considerada uma alternativa para a substituição do gás de cozinha pelo biogás, desde que os parâmetros operacionais do biodigestor estejam estáveis e o teor de metano no biogás seja de, no mínimo, 50%.

Análise econômica e ambiental da produção de biogás e biofertilizante com base no biodigestor instalado na propriedade agropecuária familiar

Aspectos metodológicos

Após a instalação do biodigestor na propriedade rural localizada no município de Luziânia, em Goiás, e após a estabilização da produção, foram levantados

dados primários da produção de biogás e do digestato, com fins de estimativa de custo e receita.

O uso do biofertilizante na propriedade foi avaliado em substituição ao fertilizante comercial que contém nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). Para isso, utilizaram-se dados de custo de produção de milho da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), referentes à segunda safra de milho de 2023/2023, agricultura empresarial, e à primeira safra de 2023/2024, agricultura familiar. Ambos os cultivos considerados foram em sistema de plantio direto, com uso de cultivares de alta tecnologia, geneticamente modificadas, para simular o uso do digestato em substituição ao fertilizante comercial NPK. Na análise, considerou-se o uso do digestato em um hectare de milho, substituindo parte do fertilizante que normalmente é utilizado no cultivo. Optou-se pelo milho nesta análise por ser uma cultura comumente utilizada para fins de alimentação animal, em propriedades agropecuárias de pequeno porte no Brasil.

Foi realizada análise química do digestato produzido na propriedade familiar em Luziânia, para estabelecer a disponibilidade química, sobretudo dos elementos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Nos fertilizantes químicos, os elementos P e K são expressos como P_2O_5 (óxido de fósforo) e K_2O (óxido de potássio), respectivamente. Foi feita a conversão para essas formas químicas, seguindo os critérios definidos pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (Ribeiro et al., 1999).

Os impactos econômicos esperados são relacionados ao excedente econômico gerado pela substituição do gás liquefeito de petróleo pelo biogás (agregação de valor da bovinocultura), conforme demonstrado em Gonçalves et al. (2023) e Guiducci et al. (2023), além de ganhos com redução no custo de produção agrícola, mediante substituição de parte do fertilizante utilizado na lavoura de milho pelo biofertilizante (digestato).

Foi feita uma análise de viabilidade econômica do biodigestor em nível de propriedade, utilizando-se um fluxo de caixa, em que o investimento no biodigestor ocorre no ano 0, orçado em R\$ 10.000,00. Foram considerados 5 anos de produção, em que o fluxo de renda anual se refere ao valor da produção do biogás, acrescido do valor relativo à redução de gastos com fertilizante. Buscou-se avaliar se esses fluxos econômicos pagam o investimento no biodigestor. Para isso, os seguintes indicadores foram avaliados: taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL) e payback descontado.

A avaliação do impacto ambiental do biogás e do digestato foi realizada em termos de emissões de CO_2 equivalentes (CO_2 eq) evitadas, no âmbito do Programa RenovaBio (Brasil, 2018). Utilizou-se a versão 7 da “Rota biometano para certificação de biocombustíveis” (RenovaCalc) (Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, 2020) no cálculo da intensidade de carbono do biogás, que foi comparada à intensidade de carbono do GLP, combustível fóssil que o biogás está substituindo. O mesmo procedimento foi adotado para estimar o impacto do uso do digestato como substituto de 50% de fertilizante NPK no cultivo de 1 hectare de milho.

A RenovaCalc corresponde a um conjunto de planilhas na plataforma Excel, contendo um banco de dados e uma estrutura de cálculo específica (Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, 2023). A RenovaCalc adota a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) atribucional em sua metodologia e prioriza a categoria “Mudança do Clima” como output da análise. A abrangência dos cálculos é “do poço à roda” (ou “do berço ao túmulo”). Nesse escopo, são contabilizados todos os fluxos de material e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente, desde a extração de recursos naturais, aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte (Matsuura et al., 2018).

Foram utilizados dados relacionados à fase agrícola, da RenovaCalc versão 7 aberta da rota de etanol de milho para simular o impacto ambiental da redução de 50% de fertilizantes NPK no cultivo de milho. Como o digestato é um resíduo, não foi atribuída carga ambiental para a fase de geração desse bioinsumo.

Potencial de uso do digestato biofertilizante

O digestato, material líquido que já foi processado no biodigestor e, portanto, com carga orgânica reduzida (já que boa parte foi convertida em biogás), contém alguns nutrientes, tornando-o passível de ser utilizado como biofertilizante na lavoura. Dessa forma, foi feita uma avaliação da composição do digestato do sistema instalado na propriedade. A análise química do digestato produzido na propriedade familiar revelou a quantidade encontrada de cada elemento expressa em g/kg de sólidos totais (ST) (Tabela 1). A amostra apresentou 4,3% de ST. Considerando uma produção diária de 200 litros de

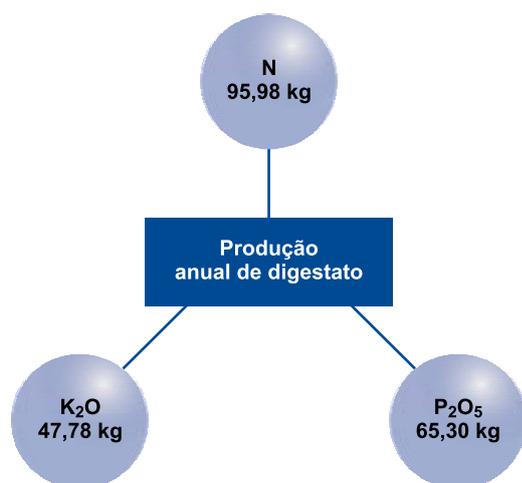
Tabela 1. Propriedades químicas do digestato.

Elemento químico	Resultado	
	(g/kg de ST)	kg/200 litros de digestato
Alumínio (Al)	9,37	
Boro (B)	0,05	
Cálcio (Ca)	8,59	
Cobre (Cu)	0,02	
Ferro (Fe)	5,59	
Potássio (K)	12,86	0,11
Magnésio (Mg)	3,95	
Manganês (Mn)	0,21	
Fósforo (P)	9,21	0,08
Enxofre (S)	3,85	
Zinco (Zn)	0,08	
Nitrogênio (N)	31,00	0,27

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da pesquisa.

digestato na propriedade (Guiducci et al., 2023), geram-se 8,6 kg de sólidos totais contendo 0,11 kg de K, 0,08 kg de P e 0,27 kg de N, entre outros nutrientes por dia.

O resultado da transformação desses elementos para a fórmula dos fertilizantes é mostrado na Figura 4, em termos de disponibilidade anual. Observa-se que a produção anual de digestato contém 95,98 kg de nitrogênio, 65,30 kg de fosfato e 47,78 kg de potássio.

**Figura 4.** Disponibilidade de componentes químicos para uso como fertilizante na propriedade.

Dada a quantidade utilizada na safra 2023/2023, de 104 kg/ha de N e 75 kg/ha de fosfato, assim como o recomendado de potássio de 70 kg/ha, tem-se que

a produção anual de digestato pode suprir até 92,3% das necessidades de nitrogênio, 87,1% de fosfato e 68,3% de potássio em uma área de 1 hectare de milho (Tabela 2).

Tabela 2. Potencial de suprimento de componentes químicos do digestato frente à demanda para cultivo de milho.

Elemento	Disponibilidade no digestato (kg/ano)	Uso no cultivo de milho (kg/ha)	Porcentagem suprida pelo digestato em 1 ha
Nitrogênio	95,98	104 ⁽¹⁾	92,3%
Fosfato	65,30	75 ⁽¹⁾	87,1%
Potássio	47,78	70 ⁽²⁾	68,3%

⁽¹⁾ Safra 2023/Conab.

⁽²⁾ Quantidade recomendada por Ribeiro et al. (1999).

Impactos econômicos e ambientais em nível de propriedade

O biodigestor instalado na propriedade, trabalhando de forma otimizada, tem capacidade de produzir o equivalente a dois botijões de 13 kg de biogás por mês. Sendo assim, a produção anual do estabelecimento é de 24 botijões ou 312 kg de biogás ao ano. O valor do botijão considerado na análise é de R\$ 120,00, o que gera uma renda adicional de R\$ 2.880,00 por ano ao estabelecimento.

No que se refere à redução de custos com o uso do biofertilizante, parte-se do dispêndio com fertilizantes (por exemplo, MAP, UREIA 45 e MAP Purificado), que é da ordem de R\$ 1.165,00 por hectare de milho, no sistema empresarial, respondendo por 25,7% do custo total, e R\$ 2.040,00 por hectare, no sistema familiar, respondendo por 29,3% do custo total. Embora o potencial de suprimento do digestato seja expressivo, como mostrado na Tabela 2, adotou-se neste estudo uma medida conservadora de substituição de 50% dos fertilizantes NPK. Sendo assim, com a utilização do digestato, a economia obtida é de R\$ 582,50 por hectare, no sistema empresarial, e R\$ 1.020,00 por hectare, no sistema familiar.

Em consequência, estimou-se uma renda anual obtida no sistema empresarial de R\$ 3.462,50, sendo R\$ 2.880,00 do biogás e R\$ 582,50 do digestato (Tabela 3). No sistema familiar, este valor chegou a R\$ 3.900,00, em razão do maior ganho com digestato, uma vez que o uso de NPK no sistema familiar é mais elevado. Em ambos os casos,

constatou-se viabilidade econômica do investimento no biodigestor, com taxa interna de retorno (TIR) de 21,6% e 27,4%, respectivamente, para uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 16% ao ano (a.a.). O valor presente líquido (VPL) de R\$ 5.000,00 (empresarial) e R\$ 6.000,00 (familiar) indicam que ao final de cinco anos de produção, além de recuperar o capital investido remunerado à taxa de 16% a.a., o investimento retorna um valor equivalente ao VPL. O payback descontado foi 3,96 no sistema empresarial e 3,41 no sistema familiar, indicando que o investimento se paga em 4 anos (sistema empresarial) e 3 anos e 3 meses (sistema familiar).

Tabela 3. Indicadores de viabilidade econômica do investimento no biodigestor, em nível de propriedade.

Indicador	Sistema empresarial	Sistema familiar
Renda com biogás	R\$ 2.880,00	R\$ 2.880,00
Renda com digestato	R\$ 582,50	R\$ 1.020,00
Fluxo de renda anual	R\$ R\$ 3.462,50	R\$ 3.900,00
Investimento no biodigestor	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
TMA	16% a.a.	16% a.a.
TIR	21,6%	27,4%
VPL	R\$ 5.000,00	R\$ 6.000,00
Payback descontado	3,96	3,41

O impacto ambiental de uma propriedade ao utilizar o biodigestor é contabilizado a partir da intensidade de carbono contida nos insumos utilizados ao longo de um ano. Sabe-se que a produção anual do biogás apresentada acima requer 7,2 toneladas de esterco e 90.000 litros de água. A intensidade de carbono (IC) resultante desse processo é de 3,59 gCO₂eq/MJ, enquanto o GLP tem IC de 85 gCO₂eq/MJ (Tabela 4).

Tabela 4. Intensidade de carbono do biogás e GLP.

Intensidade de carbono	gCO ₂ eq/MJ	PCI ⁽¹⁾ em MJ	Emissão (kgCO ₂ eq)
Biogás (calculado na RenovaCalc v7)	3,59	604,16	2,17
GLP	85	604,16	51,35

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

⁽¹⁾ Poder calorífico inferior.

Considerando o poder calorífico inferior do GLP que é de 46,47 MJ/kg foi possível calcular o conteúdo energético de um botijão de 13 kg, que é de 604,16 MJ. As emissões do ciclo de vida do GLP representam um impacto de 85 gCO₂eq/MJ, de forma que o uso de um botijão de gás representa a emissão de 51,35 kgCO₂eq para a atmosfera. Já a obtenção da mesma quantidade de energia, por meio do biogás, representa um impacto de 2,17 kgCO₂eq (Tabela 4). Ou seja, a substituição de um botijão de GLP tem o potencial de evitar a emissão de 49,18 kgCO₂eq.

Já o impacto ambiental do uso do biofertilizante (digestato) no cultivo de milho teve como referência o perfil típico de produção definido na RenovaCalc, que busca representar a quantidade média de insumos aportados aos sistemas de produção agrícola brasileiros, expresso em kgCO₂eq/t de produto agrícola. No caso do cultivo de milho, esse perfil corresponde a uma emissão de 242,66 kgCO₂eq/t milho. Reduzindo-se em 50% o uso dos fertilizantes, a emissão passa a ser de 162,39 kgCO₂eq/t milho, que corresponde a uma redução de emissão de 80,27 kgCO₂eq/t milho.

Tendo em vista as emissões do ciclo de vida do GLP frente ao biogás e dos fertilizantes químicos utilizados na produção de uma tonelada de milho, pode-se sintetizar o impacto ambiental de uma propriedade, que produz e consome biogás e biofertilizante, conforme mostrado na Figura 5. Foram consideradas a produção anual de biogás equivalente a 24 botijões de 13 kg por ano em substituição ao GLP e a produtividade de milho de 6 t/ha (empresarial) e 7,2 t/ha (familiar).

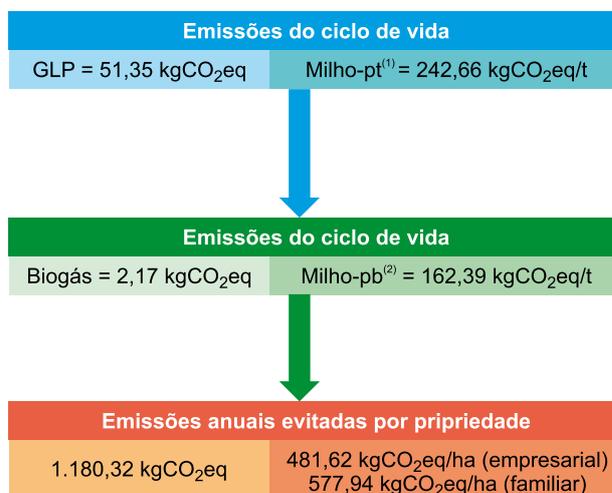


Figura 5. Síntese do impacto ambiental do biofertilizante por propriedade, expresso em emissões de CO₂ evitadas.

⁽¹⁾ Milho-pt corresponde ao perfil típico de produção.

⁽²⁾ Milho-pb corresponde ao perfil com uso de biofertilizante.

Potencial de produção de biogás e biofertilizante em estabelecimentos agropecuários de pequeno porte no Brasil: impactos econômico e ambiental

Para dimensionar o potencial de impacto econômico e ambiental do biogás e do digestato no Brasil, consideraram-se três cenários, focados em estabelecimentos com efetivos bovinos entre 11 e 50 cabeças (Figura 6). No primeiro cenário (Cenário 1), apenas 10% do grupo de interesse (79.204 estabelecimentos) adotam o biodigestor, com fins de produção e consumo de biogás e biofertilizante. No segundo cenário (Cenário 2), há 50% de adesão do segmento (396.012 estabelecimentos). Já no terceiro cenário (Cenário 3), mais otimista, 90% dos estabelecimentos adotam o biodigestor (712.837 estabelecimentos).

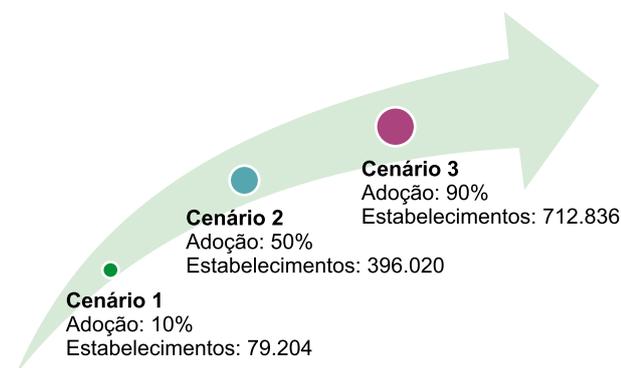


Figura 6. Cenários de adoção do biodigestor no Brasil, em percentual de estabelecimentos agropecuários com efetivo bovino na faixa de 11 a 50 cabeças.

Potencial de produção e impactos econômicos

A Tabela 5 mostra os resultados do impacto econômico ex ante da produção e do consumo de

biogás e digestato nos três cenários propostos. No Cenário 1, são produzidas 24,7 mil toneladas de biogás, com benefício econômico de R\$ 228,11 milhões. Nos Cenários 2 e 3, a produção passa para 123,5 mil toneladas e 222,4 mil toneladas de biogás, respectivamente, com impacto econômico de R\$ 1,1 bilhão e R\$ 2,0 bilhões ao ano, respectivamente.

Com relação ao digestato, verificou-se potencial para substituir até 92,3% do N e 87,1% do P_2O_5 usados no cultivo de milho safrinha em 2023. Nos dados informados pela Conab, não houve aplicação de K no cultivo empresarial, apenas no sistema familiar. Todavia, o digestato poderia suprir até 68,3% do requerimento médio do milho, estabelecido em 70 kg/ha de K_2O por Ribeiro et al. (1999).

Diferentemente da adubação convencional, cuja aplicação se dá predominantemente no momento do plantio/tratos culturais, evitando perdas, o digestato poderá ser armazenado para aplicações periódicas ao longo do ano, de modo a melhorar a fertilidade do solo com o tempo. Sendo assim, optou-se, nesta análise ex ante, por um percentual de substituição de 50% do fertilizante, percentual considerado conservador frente ao potencial apresentado nas análises químicas laboratoriais.

A área total de milho nos cenários propostos corresponde ao número de estabelecimentos em cada cenário, pois cada estabelecimento irá cultivar uma área de 1 hectare de milho. O benefício econômico (Tabela 5) pela redução de custo com fertilizante é de R\$ 46,14 milhões no cultivo empresarial, no Cenário 1; e R\$ 80,79 milhões, no cultivo familiar. No Cenário 2, esses valores passam a R\$ 230,7 milhões (cultivo empresarial) e R\$ 403,94 milhões (cultivo familiar). Por fim, no Cenário 3, quando 90% dos estabelecimentos estão produzindo e utilizando digestato, a economia com fertilizantes chega a R\$ 415,23 milhões no sistema de cultivo empresarial e R\$ 727,09 milhões no sistema de cultivo familiar. Esses valores referem-se ao conjunto de estabelecimentos no Brasil, com rebanho bovino entre 11 e 50 cabeças (IBGE, 2017).

Tabela 5. Impacto econômico da produção e consumo de biogás e digestato, por ano.

Cenário	Número de estabelecimentos	Produção de biogás (t)	Benefício econômico (R\$ milhões)		
			Biogás	Digestato	
				Empresarial	Familiar
1	79.204	24.711,68	228,11	46,14	80,79
2	396.021	123.558,40	1.140,54	230,68	403,94
3	712.837	222.405,11	2.052,97	415,23	727,09

Impactos ambientais

O impacto ambiental do biogás nos cenários de adoção do biodigestor foi expresso em emissões evitadas (Tabela 6). Observa-se um potencial de evitar a emissão de 93.487,3 tCO₂eq no primeiro cenário, chegando a 467.436,57 tCO₂eq no Cenário 2 e 841.385,83 tCO₂eq no Cenário 3, ao se substituir o consumo de GLP pelo de biogás gerado nas propriedades.

O impacto ambiental potencial do uso do digestato como biofertilizante nos cenários de adoção propostos é mostrado na Tabela 7. Para calcular as emissões evitadas em 1 hectare de milho, considerou-se a produtividade média de 6 t/ha de milho no cultivo empresarial (safra 2023/2023) e 7,2 t/ha no cultivo familiar (safra 2023/2024).

Observa-se que, no Cenário 1, para o sistema de cultivo empresarial, a substituição de 50% de fertilizante NPK por digestato permite reduzir a emissão de 228.877,67 tCO₂eq, podendo chegar a 2,06 milhões de tCO₂eq no Cenário 3. No sistema familiar, a redução é de 329.583,85 tCO₂eq no Cenário 1, atingindo 2,97 milhões de tCO₂eq no Cenário 3. A diferença das emissões evitadas deve-se ao maior uso de fertilizantes e à maior produtividade observados no sistema de cultivo familiar.

Para efeitos de comparação, Lacerda et al. (2009) relatam valores de fixação de CO₂eq entre 103,4 e 689,3 t/ha para as florestas tropicais nas Américas. Todavia, os autores alertam que os valores encontrados na literatura sobre fixação de carbono na forma de CO₂eq são muito variáveis. Dessa forma, considerando-se as emissões evitadas com o biogás e o digestato, tem-se no Cenário 1 o potencial de fixação de carbono similar a uma área de 613,77 hectares a 4.091,60 hectares de florestas tropicais, enquanto a mitigação observada no Cenário 2 equivale a uma área de floresta que varia de 3.068,85 hectares a 20.457,99 hectares. No Cenário 3, essa área varia de 5.532,92 hectares a 36.824,38 hectares de floresta (Figura 7).

Tabela 6. Impacto ambiental da substituição de GLP por biogás, medido em tCO₂eq.

Cenário	Número de botijões de 13 kg (GLP) substituídos/ano	Emissão GLP (tCO ₂ eq)	Emissão de biogás (tCO ₂ eq)	Emissão evitada (tCO ₂ eq)
	A	B	C	D = B – C
1	1.900.898,40	97.609,90	4.122,58	93.487,31
2	9.504.492,00	488.049,49	20.612,91	467.436,57
3	17.108.085,60	878.489,08	37.103,24	841.385,83

Tabela 7. Impacto ambiental da substituição de fertilizante comercial por digestato, medido em tCO₂eq evitadas.

Cenário	Número de estabelecimentos	Emissão evitada (tCO ₂ eq)	
		Empresarial	Familiar
1	79.204,10	228.877,67	329.583,85
2	396.020,50	1.144.388,36	1.647.919,24
3	712.836,90	2.059.899,05	2.966.254,63

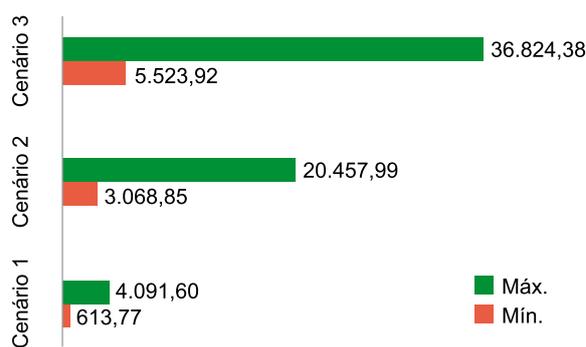


Figura 7. Emissão de CO₂ evitada pelo uso do biogás e digestato, expressas em área de floresta tropical equivalente, por cenário.

Conclusão

Os resultados deste estudo mostraram ganhos econômico, social e ambiental expressivos, com a adesão de pequenos e médios estabelecimentos agropecuários à lógica da economia circular, por meio do aproveitamento de dejetos da bovinocultura para produção de biogás e biofertilizante (digestato) voltada ao autoconsumo.

Em nível de propriedade agropecuária, verificou-se que o investimento no biodigestor nas condições estabelecidas neste estudo é viável economicamente, sendo pago em menos de 4 anos, considerando-se apenas a renda adicional obtida com o biogás e o digestato.

Nos cenários de adoção propostos, a produção de biogás em substituição ao GLP permite que o conjunto de estabelecimentos agropecuários com efetivo bovino entre 11 e 50 cabeças gerem renda adicional da ordem de R\$ 228,11 milhões, quando 10% do segmento aderem à produção de bioenergia. Quando a adesão é de 50% do segmento, obtém-se renda adicional de R\$ 1.140,54 milhão e R\$ 2.052,97 milhões para 90% de adesão. Em termos de impacto ambiental, é possível evitar a emissão de 93.487,31 t CO₂eq (Cenário 1), 467.436,57 t CO₂eq (Cenário 2) 841.385,83 t CO₂eq (Cenário 3) com a substituição de GLP por biogás nas propriedades.

O uso do digestato como biofertilizante no cultivo de 1 hectare de milho nas propriedades também resultou em impactos econômicos e ambientais significativos. Os resultados da análise química do digestato mostraram que a produção anual de digestato contém 95,98 kg de N, 65,30 kg de fosfato e 47,78 kg de potássio, o que permitiria suprir até 92,3% das necessidades de nitrogênio, 87,1% de fosfato e 68,3% de potássio em uma área de 1 hectare de milho. Para um sistema de cultivo familiar, a redução de 50% de NPK gera um ganho econômico da ordem de R\$ 80,79 milhões, se 10% do segmento estiverem aderindo à produção de biogás e digestato. Esse montante se eleva para R\$ 403,94 milhões, se houver 50% de adesão, e R\$ 727,09 milhões se 90% dos estabelecimentos com efetivo bovino de 11 a 50 cabeças aderirem à produção. O impacto ambiental do uso do digestato em substituição a 50% do fertilizante é de 329,6 mil t CO₂eq no Cenário 1, podendo chegar a 2,97 milhões tCO₂eq no Cenário 3, no sistema de cultivo familiar.

Conclui-se que há espaço para a ampliação da produção de biogás e derivados no setor agropecuário brasileiro, mais particularmente na cadeia produtiva da bovinocultura. Verificou-se que a inclusão de estabelecimentos agropecuários de menor porte no processo de transição energética, por meio de práticas de economia circular, permite a obtenção de resultados importantes em termos de sustentabilidade da cadeia produtiva, com geração de renda, autonomia energética e mitigação de impactos ambientais.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (Brasil). **RenovaBio**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/>

[producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio](#). Acesso em: 25 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (Brasil). **RenovaCalc**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resolução n. 758, de 23 de novembro de 2018. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras. **Diário Oficial da União**, 27 nov. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/resolucaoanp-758-2018.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

CAPACIDADE instalada da cogeração de energia no Brasil pode crescer em até 1 GW no ano de 2024. **Petronotícias**, 10 jan. 2024. Entrevista com Newton Duarte, presidente executivo da Associação da Indústria da Cogeração. Disponível em: <https://petronoticias.com.br/capacidade-instalada-na-cogerao-de-energia-pode-crescer-em-ate-1-gw-no-brasil-em-2024>. Acesso em: 25 mar. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEIS. **Panorama do biogás no Brasil 2022**. Relatório Técnico nº 001, Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022>. Acesso em: 18 mar. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama do Biogás no Brasil 2023**. Relatório Técnico nº 001/2024, Foz do Iguaçu, 2024. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F54738%2F1716811508PANORAMA_DO_BIOGS_2023.pdf. Acesso em: 16 jul. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Biogás no Brasil, histórico e perspectiva de futuro**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro>. Acesso em: 16 jul. 2024.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Mapa do biogás no Brasil?** Conheça as atualizações do Biogasmapp Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/mapa-do-biogas-no-brasil-conheca-as-atualizacoes-do-biogasmapp>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FAO. FAOSTAT. **Crops and livestock products**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 3 ago. 2023.

GUIDUCCI, R. do C. N.; SABAINI, P. S.; BASTOS, J. A.; GONÇALVES, S. B.; SOARES, I. P. Impacto econômico-ambiental da produção de biogás para consumo próprio em estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio

porte. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 7., 2023, Brasília, DF.

Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 41-45.

Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158048/1/Impacto-economico-ambiental.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

GONÇALVES, D. de A.; GUIDUCCI, R. do C. N.; SABAINI, P. S.; SOARES, I. P. **Impacto econômico e ambiental da adoção de biodigestor de pequena escala para produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura leiteira em propriedade rural familiar.** In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 61., 2023, Piracicaba. Agropecuária do futuro: tecnologia, sustentabilidade e a segurança alimentar: anais.

Piracicaba: ESALQ, USP, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1159005/1/IMPACTO-ECONOMICO.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

IBGE. SIDRA. **Censo Agropecuário 2017.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados--definitivos>. Acesso em: 2 ago. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Statistics time series: what are the latest trends in renewable energy?** 18 July, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. Acesso em: 25 mar. 2024.

LACERDA, J. S.; COUTO, H. T. Z.; HIROTA, M. M.; PASISHNYK, N.; POLIZEL, J. L. S. **Estimativa de biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas.** São Paulo: ESALQ, 2009. Disponível em: <http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:metrvm:metrvm-2009-n05.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2023.

MATSUURA, M. I. F. SCACHETTI, M.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A. M.; BAYMA, G.; PICOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **RenovaCalcMD: método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio.** 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cp10-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

MILANEZ, A.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; SOUZA, J. A. P. de; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas.** **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47_Biogas_FECHADO.pdf. Acesso em: 7 dez. 2023.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável. Conexão Ambiental. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).** Disponível em: <https://www.conexaoambiental.pr.gov.br/Pagina/Objetivos-de-Desenvolvimento-Sustentavel-ODS-0>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. (ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais:** 5a. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

SILVA, I. M. **Estudo da viabilidade da implantação de um biodigestor sertanejo no assentamento trangola em currais novos (RN).** 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

