

PARTE IV

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E AGRICULTURA

*"O mundo não será destruído
por quem pratica o mal, mas por
quem o vigia sem fazer nada"*
Albert Einstein

INVENTÁRIOS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA AGRICULTURA E PECUÁRIA

Magda Aparecida de Lima, Rosana Faria Vieira, Alfredo José Barreto Luiz, Marcos Corrêa Neves e Ana Paula Contador Packer

INTRODUÇÃO

O Brasil foi um dos primeiros países a assinarem a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), resultado da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em junho de 1992, a qual foi ratificada pelo Congresso Nacional em 1994. Dentre os compromissos assumidos pelo país junto à esta Convenção está o de desenvolver e atualizar, periodicamente, inventários nacionais das emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros dos gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, além de fornecer uma descrição geral das providências para implementar a Convenção. O documento que apresenta as estimativas de emissão e sumidouros de gases de efeito estufa, bem como sobre as políticas de governo endereçadas aos esforços de mitigação e de adaptação das atividades socioeconômicas nacionais é denominado de Comunicação Nacional. A Comunicação Nacional brasileira segue as diretrizes estabelecidas pela Decisão 10 da 2ª Conferência das Partes (COP) da UNFCCC (documento FCCC/CP/1996/15/Add.1, de 17 de julho de 1996). No Brasil, o então Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), hoje Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), foi incumbido de coordenar os trabalhos destinados à elaboração da Comunicação Nacional brasileira, envolvendo uma rede de instituições de pesquisa e outros órgãos, com recursos financeiros aportados pelo *Global Environmental Facility* (GEF), em português Fundo Global para o Meio Ambiente, programa implementado pelo Banco Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (Brasil, 2004). O Brasil apresentou até o presente (2021) quatro Comunicações Nacionais, cujos relatórios de referência sobre inventários de emissão de gases de efeito estufa estão disponíveis no site do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE).

O primeiro inventário brasileiro de gases de efeito estufa foi elaborado em referência ao período de 1990 a 1994. Por ser o primeiro relatório preparado pelo país,

houve um esforço significativo para a organização e compilação de dados históricos, e na adoção de metodologias a serem seguidas para a elaboração das estimativas para os diferentes setores da economia, como energia, indústria, transporte, uso da terra, agropecuária e resíduos. À Embrapa coube apresentar estimativas de emissão de gases de efeito estufa para o setor agropecuário, a saber: 1- cultivo de arroz irrigado por inundação; 2- pecuária e sistema de tratamento de dejetos animais; 3- queima de resíduos agrícolas e 4- solos agrícolas. As atividades agrícolas constituem uma das principais fontes globais de emissão de gases de efeito estufa. Estima-se que 14% do potencial de aquecimento global (em inglês, *Global Warming Potential*) em um horizonte de 100 anos (PAG_{100}) sejam devidos ao setor agrícola, excluída a fração correspondente às mudanças do uso da terra (Core Writing Team et al., 2014) (Figura 26.1). O metano e o óxido nitroso são os principais gases emitidos pelo setor agropecuário, com uma vida útil na atmosfera estimada em 12,4 e 121 anos, respectivamente (Core Writing Team et al., 2014).

O metano (CH_4) é um gás com potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do CO_2 , para um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014). O metano é um gás inodoro que permanece na atmosfera por um período de tempo relativamente pequeno, aproximadamente onze anos (Core Writing Team et al., 2014), mas com um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do CO_2 , para um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014). As concentrações de CH_4 aumentaram, mundialmente, cerca 150% de 1950 até 2011, passando de níveis pré-industriais de 722 ppb para 1330 ppb (Myhre; Shindell, 2013). Contabiliza-se que as emissões antrópicas representam cerca de 50 a 65% das emissões totais desse gás (Myhre; Shindell, 2013). Grande parte das fontes de metano são biogênicas, dentre elas as várzeas, os campos de arroz inundados, a queima de biomassa, os animais ruminantes e sistemas de manejo de dejetos animais.

As estimativas globais de emissão de óxido nitroso (N_2O) de origem antrópica indicam uma média de 7,3 Teragramas ($Tg = 10^{12}$ gramas) N/ano entre 2007 e 2016 (Tian et al., 2020), sendo que os solos cultivados e os dejetos da pecuária juntos contribuem com cerca de 52% deste total. Estudos recentes apontam que a concentração de N_2O na atmosfera aumentou cerca de 20% em relação a níveis pré-industriais – de 270 partes por bilhão (ppb) em 1750 para 331 ppb em 2018, com um crescimento mais rápido observado nos últimos 50 anos devido às emissões derivadas de atividades humanas (Core Writing Team et al., 2014).

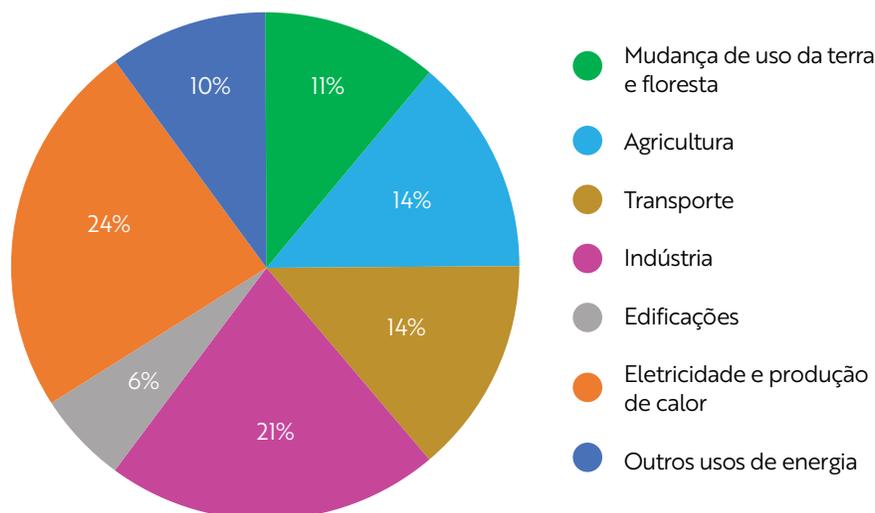


Figura 26.1. Contribuições às emissões globais de GEE por setores da economia, utilizando a métrica de GWP em um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014).

Como determina a Convenção do Clima, os inventários de emissão de gases de efeito estufa devem incluir apenas as emissões e remoções de gases de efeito estufa causadas por atividades humanas (antrópicas) (Brasil, 2004), conforme as diretrizes estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Para os inventários relativos ao setor agropecuário são consideradas as emissões dos seguintes gases: metano (CH_4), óxido nítrico (N_2O), o monóxido de carbono (CO), e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Metodologias destinadas à construção de inventários nacionais de gases de efeito estufa são apresentadas pelo IPCC, sendo progressivamente refinadas em função de periódicas atualizações científicas sobre o tema. A próxima seção abordará o uso destas metodologias.

METODOLOGIA DO IPCC PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS

O IPCC, por meio de suas diretrizes (*Guidelines*), recomenda metodologias de cálculo para a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa, cobrindo temas como energia, processos industriais, consumo de produtos, agricultura, florestas e outros usos do solo e resíduos. Estas diretrizes estabelecem diferentes níveis de

complexidade metodológica e de detalhamento das informações de entrada requeridas para a realização das estimativas de emissão de gases, que são chamados *Tiers* (camadas em inglês). Os *Guidelines* do IPCC classificam as abordagens metodológicas em três *Tiers*, sendo o *Tier 1* o método básico, que utiliza uma abordagem *top-down*, onde são utilizados fatores de emissão padrão (*default*) e dados pré-estabelecidos para os parâmetros associados à atividade. O *Tier 2* consiste no mesmo método do *Tier 1* mas com uso de fatores de emissão e outros parâmetros específicos ao país. O *Tier 3* é o nível mais complexo, geralmente empregando abordagens mais sofisticadas e modelagem. O IPCC recomenda que seja adotado o maior nível de complexidade possível pelo país e também fornece árvores de decisão específicas a cada categoria, com sugestão de métodos para todas as categorias. Para fontes de emissão que não sejam chaves no país, é recomendado que se utilize o *Tier 1*. Além disso, o IPCC disponibiliza um relatório complementar sobre boas práticas a serem utilizadas na elaboração de inventários nacionais (Penman et al., 2000), com informações mais detalhadas e complementares aos *Guidelines*.

CONTRIBUIÇÃO AOS INVENTÁRIOS NACIONAIS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO SETOR AGROPECUÁRIO NO BRASIL

Cultivo de Arroz irrigado por inundação

O metano é produzido durante a decomposição anaeróbia de substâncias orgânicas, mediante a ação de microrganismos do Domínio *Archae* (chamados de metanogênicos), sendo que a condição mais importante para a sua formação é a anaerobiose (ausência de oxigênio) que ocorre nos solos sob inundação. O arroz é uma planta semiaquática provida de aerênquima, tecido vascular que favorece a troca de gases entre as raízes e os tecidos acima da superfície da água, permitindo o transporte de O_2 atmosférico para as raízes e de outros gases, como o CH_4 produzido no solo anaeróbio (Neue, 1993).

O metano produzido nos arrozais é liberado para a atmosfera por várias rotas, sendo a principal delas por transporte difusivo pelo aerênquima. Segundo Bont et al. (1978), a presença de plantas de arroz facilita o escape de metano para a atmosfera na ordem de 7 a 10 vezes mais que em solos inundados sem cultivo de arroz. A formação de bolhas de gás na superfície da água e sua difusão na água do solo constituem outras vias de escape de metano a partir destes sistemas agrícolas.

Ao cultivo de arroz irrigado por inundação, atribui-se uma emissão anual global de 30 [24–40] Tg CH_4 ano⁻¹ (Saunois et al., 2020) (Tg = 10^{12} kg), correspondendo a cerca

de 8% do total de fontes antrópicas globais, estimadas em 380 Tg CH₄ para o ano de 2017 (Figura 26.2). No Brasil, estimou-se uma emissão de 331,1 Gigagramas (Gg = 109 gramas) de metano em 1990 e 398,5 Gg em 2016 proveniente do cultivo de arroz irrigado (Brasil, 202c) (Tabelas 26.1 e 26.2). Para os quatro inventários já realizados no país foram utilizados dados de fatores de emissão padrões (*default*) recomendados pelo IPCC, sendo que a partir do terceiro inventário, fatores de emissão específicos para os sistemas de produção utilizados no Estado do Rio Grande do Sul foram aplicados (Brasil, 2010). Como ponto de partida, no primeiro inventário foram realizados levantamentos de sistemas de produção em todos os estados brasileiros, com o apoio de instituições de pesquisa, associações de produtores, e bases de dados publicados.

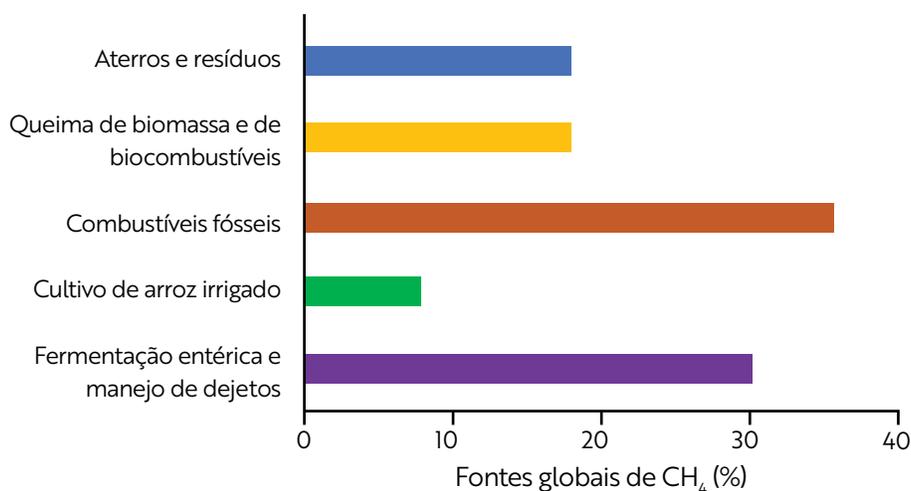


Figura 26.2. Fontes globais de metano de origem antrópica em 2017, estimadas por Saunois et al. (2020).

Tabela 26.1. Emissões de GEE pela agropecuária brasileira no ano de 1994.

GEE	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x
			Gg	
Total Brasil	15576,9	396,23	37933	2192
Total Agropecuária	11.947,0	306,62	1.753	65
- Fermentação entérica				
- Bovinos de corte	8631,9			
- Bovinos de leite	1.860,8			
- Ovinos	92,3			
- Suínos	35,1			
- Outros animais	288,7			
- Manejo de dejetos animais	594,1	9,77		
- Bovinos de corte	200,2	0,35		
- Bovinos de leite	69,5	3,08		
- Ovinos	3,1	-		
- Suínos	284,9	1,38		
- Outros animais	36,4	0,42		
- Emissões indiretas de N ₂ O	-	4,54		
- Cultivo de arroz inundado	403,4	-		
- Solos agrícolas				
- Fertilizantes sintéticos		17,77		
- Adubos orgânicos		8,80		
- Deposição de dejetos em pastagem		143,36		
- Resíduos agrícolas		50,36		
- Mineralização de N associada a perda de C do solo		2,90		
- Manejo de solos orgânicos		5,47		
- Emissões indiretas				
- Deposição atmosférica		24,96		
- Lixiviação/Escurrimto superficial		40,20		
- Queima de resíduos	40,5	3,02	1753	65

Tabela 26.2. Emissões de GEE pela agropecuária brasileira no ano de 2016.

GEE	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x
	Gg			
Total Brasil	19333,2	586,09	24.044	2.548
Total Agropecuária	14.715,7	510,46	498	18
- Fermentação entérica				
- Bovinos de corte	11350,6			
- Bovinos de leite	1736,7			
- Ovinos	92,0			
- Suínos	39,9			
- Outros animais	243,3			
- Manejo de dejetos animais				
- Bovinos de corte	266,5	1,44		
- Bovinos de leite	152,8	3,23		
- Ovinos	3,4			
- Suínos	373,9			
- Outros animais	46,6			
- Emissões indiretas de N ₂ O		7,85		
- Cultivo de arroz inundado	398,5			
- Solos agrícolas				
- Emissões diretas				
- Fertilizantes sintéticos		67,80		
- Adubos orgânicos		17,24		
- Deposição de dejetos em pastagem		186,83		
- Resíduos agrícolas		97,52		
- Mineralização de N associada a perda de C do solo		4,18		
- Manejo de solos orgânicos		6,40		
- Emissões indiretas				
- Deposição atmosférica		42,87		
- Lixiviação/Escurrimto superficial		70,92		
- Queima de resíduos	11,5	0,86	498	18

Pecuária e manejo de dejetos animais

Herbívoros ruminantes, como bovinos, ovinos, bubalinos, muares e caprinos produzem metano por meio da fermentação entérica, um processo digestivo que ocorre no rúmen destes animais. A fermentação do material vegetal ingerido no rúmen é um processo anaeróbio efetuado pela população microbiana ruminal, em que os carboidratos celulósicos são convertidos em ácidos graxos de cadeia curta (ácido acético, ácido propiônico e butírico, principalmente), os quais são utilizados pelo animal como fonte de energia. Os microrganismos metanogênicos que estão presentes no rúmen obtêm energia para seu crescimento utilizando H_2 para reduzir CO_2 e formar metano, que é então eructado ou exalado para a atmosfera. As emissões globais de metano geradas por esta fonte mais o manejo de dejetos animais correspondem a cerca de 30% das emissões totais de metano geradas por fontes antrópicas (Saunois et al., 2020) (Figura 26.2). O Brasil possui o maior rebanho bovino mundial com fins comerciais, sendo que grande parte dos animais é do tipo zebuino, criados em sistemas predominantemente extensivos, de baixo investimento. Cerca de 91,5% das emissões de CH_4 atribuídos ao setor agrícola provêm da pecuária, e deste percentual a grande parte provêm da pecuária bovina. Somado a outras fontes de metano, a evolução das emissões anuais de CH_4 no Brasil é representada na Figura 26.3.

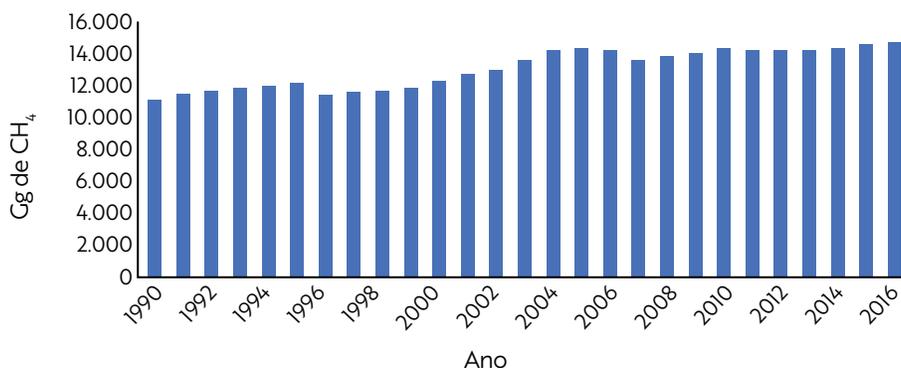


Figura 26.3. Evolução das emissões de CH_4 provenientes da agropecuária no Brasil, de 1990 a 2016. Fonte: Brasil (2020d).

Para a elaboração dos inventários, um farto levantamento de dados foi originalmente realizado sobre as atividades de produção pecuária no país, abrangendo todas as categorias animais, com base em dados oficiais, incluindo IBGE e outras fontes de dados, e de literatura disponível. A metodologia do IPCC apresenta valores *default* de fatores de emissão de metano, obtidos a partir de dados de consumo de alimento, ener-

gia de manutenção, taxa de prenhez, e da taxa de sua conversão a metano, entre outros parâmetros, e que variam em função do sistema de produção e das características dos animais. Uma revisão profunda e atualizada sobre esses parâmetros foi realizada desde o primeiro relatório de referência, em função da literatura disponível e em consulta a especialistas nas áreas de conhecimento envolvidas. À época da elaboração do relatório de referência para a Segunda Comunicação Nacional, o IBGE estava realizando o Censo Agropecuário de 2006, com a inclusão de novas variáveis, para atender às diversas demandas apontadas pelo Conselho Consultivo do Censo, incluindo as da elaboração de inventários de emissão de gases. Entretanto, os resultados deste censo foram divulgados na fase final de elaboração daquele relatório de referência, embora tenha sido possível a utilização de dados sobre sistemas de manejo de dejetos existentes no país, tornados acessíveis pelo IBGE à equipe de elaboração do inventário.

Em função da indisponibilidade de dados na literatura nacional sobre fatores de emissão de metano por fermentação entérica e de sistemas de manejo de dejetos, fatores de emissão de metano *default* recomendados pelos *Guidelines* do IPCC, de 2006 (Eggleston et al., 2006) foram utilizados para algumas categorias. A utilização do *Tier 2* foi empregada para a categoria de bovinos de corte e de leite, bem como para sistemas de manejo de dejetos de bovinos e de suínos. O mesmo procedimento foi aplicado nos relatórios seguintes, seguindo os *Guidelines* de 2006 e o IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

Em 2019, o IPCC publicou um refinamento dos *Guidelines* do IPCC de 2006 (Gavrilova et al., 2019) trazendo fatores de emissão *default* atualizados, à luz da literatura mundial mais recente. Para bovinos de leite, por exemplo, os valores médios de fatores de emissão podem variar de 93 a 138 kg de CH_4^{-1} animal⁻¹ ano⁻¹ na América do Norte e em países do leste europeu, enquanto em países sul-americanos, estimam-se fatores de emissão entre 78 a 104 kg de CH_4^{-1} animal⁻¹ ano⁻¹, em sistemas de baixa e alta produtividade, respectivamente (Gavrilova et al., 2019).

Queima de resíduos agrícolas

Historicamente, o fogo sempre foi utilizado na agricultura para suprimir os resíduos agrícolas de lavouras e facilitar colheitas, além de combater pragas. A queima de resíduos agrícolas produz emissões de CO_2 (dióxido de carbono), a qual não é considerada como uma emissão líquida, pois o CO_2 emitido é reabsorvido pela cultura através da fotossíntese. Todavia, durante o processo de combustão, outros gases são produzidos, os quais têm suas taxas de emissões dependentes do tipo de biomassa e das condições da queima. Na combustão com chama são gerados os gases N_2O (óxido nitroso) e NO_x (óxidos de nitrogênio), CH_4 (metano) e CO (monóxido de carbono) (Eggleston et al., 2006; Brasil, 2016 e 2020c).

O pico das emissões totais de gases de efeito estufa provenientes da queima de palha de cana-de-açúcar no Brasil ocorreu no ano de 2007, apresentando queda nos anos seguintes (Figura 26.4). Tal fato está associado à transição do sistema de colheita manual para mecanizada, a qual se intensificou no ano de 2007, decorrente principalmente de um acordo voluntário, firmado neste mesmo ano, por representantes do Estado de São Paulo e integrantes da indústria sucroalcooleira, no qual assinaram o *Protocolo Agroambiental do Setor Sucoenergético do Estado em São Paulo*, antecipando os prazos para a eliminação gradual da queima de cana-de-açúcar de 2021 para 2014 nas áreas mecanizáveis e de 2031 para 2017 nas áreas não mecanizáveis.

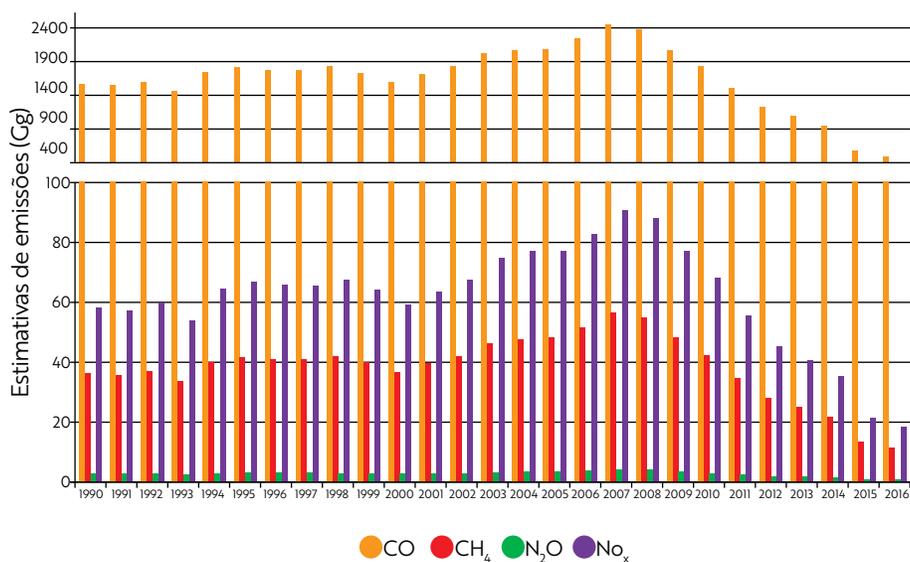


Figura 26.4. Evolução das emissões totais de GEE provenientes da queima de resíduos de cana-de-açúcar no Brasil de 1990 a 2016.

Embora a queima em cultivos de cana-de-açúcar ainda ocorra no Brasil, não há dados oficiais da proporção desta prática por área colhida. Contudo, o quinto volume do “Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar” (CONAB, 2018) apresenta o percentual de colheita mecanizada e manual, por regiões e estados, para os anos referentes ao período de 2007 a 2016 (Figura 26.5). Como a colheita manual é inviável sem a queima dos resíduos, a coleção de mapas com os dados da CONAB (2018) referentes à evolução do percentual da colheita de cana-de-açúcar realizada de modo manual está correlacionada diretamente com a porcentagem de área queimada nos estados (Garofalo et al., 2020).

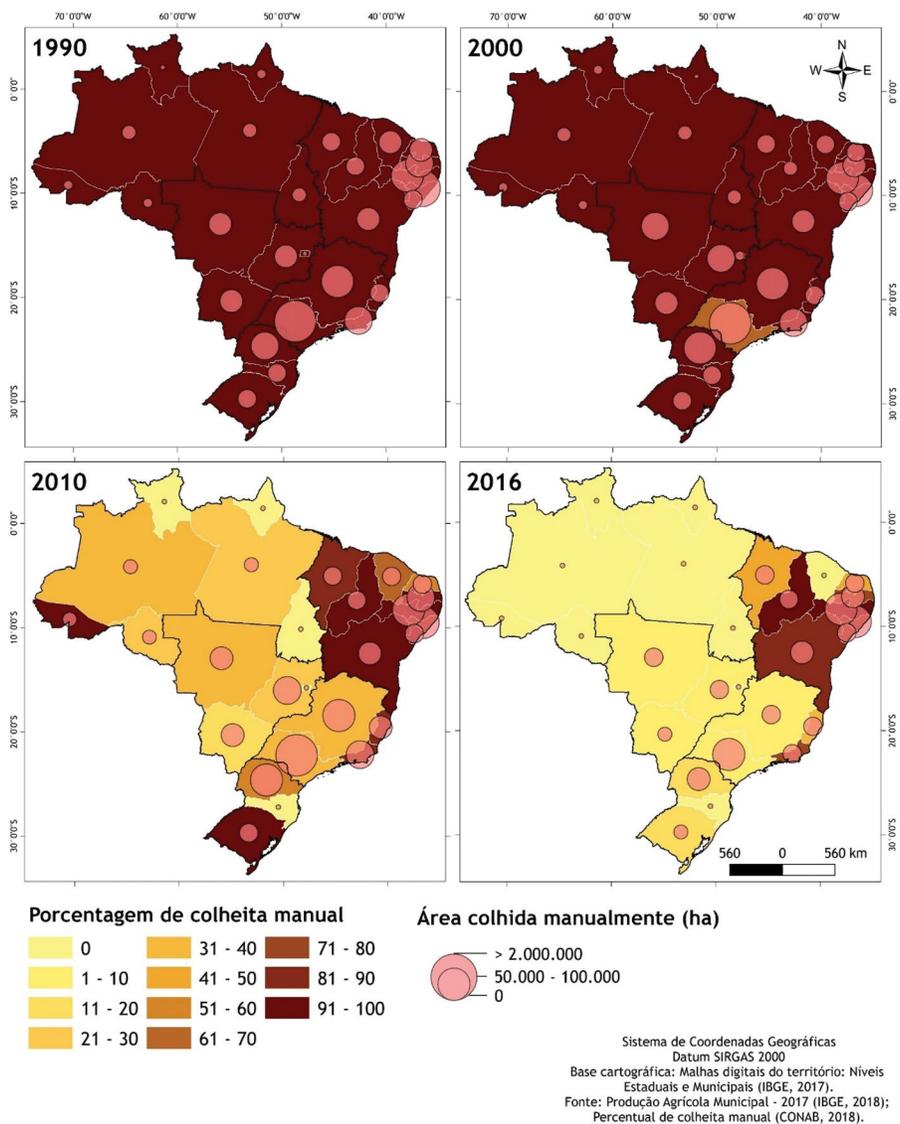


Figura 26.5. Mapeamento do percentual de colheita manual de cana-de-açúcar no Brasil, entre os anos de 1990 e 2016.

As estimativas estaduais destacam que as emissões do estado de São Paulo representaram até o ano de 2010, 50% das emissões nacionais (Figura 26.6). Já em 2016, devido a automatização da colheita da cana, as emissões do estado tiveram um decréscimo e corresponderam à 29% das emissões nacionais. Em contraste, as emissões dos estados Alagoas e Pernambuco começaram a ter maior representatividade nas emissões nacionais, passando de 9% e 8% em 1990, para 17% e 15% em 2016, respectivamente. Isso se deve ao fato da colheita manual representar na região nordeste, atualmente, 80% do sistema de colheita, e nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, maiores produtoras de cana-de-açúcar do país, menos de 5% (CONAB, 2018).

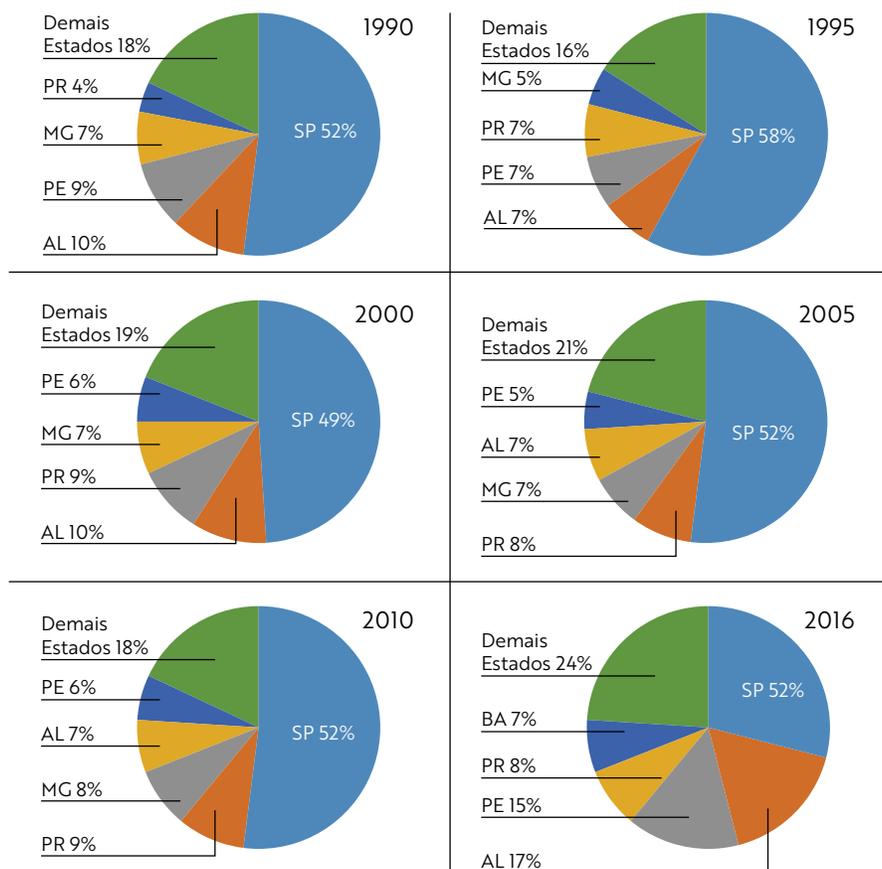


Figura 26.6. Contribuições estaduais nas emissões de GEE por queima de resíduos de cana-de-açúcar no Brasil para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2016.

Solos agrícolas

Dentre os GEE, o N_2O é o que possui maior importância para os sistemas agrícolas, uma vez que 70% das emissões globais deste gás se originam da dinâmica do N no solo (Ussiri et al., 2013). A crescente demanda por alimentos e rações animais tendem a impulsionar o aumento de suas emissões. Este gás é capaz de absorver a radiação infravermelha e retransmiti-la sob a forma de energia térmica com um potencial de aquecimento de 265 vezes maior do que o CO_2 (Core Writing Team, 2014). Além disto, o óxido nitroso está relacionado com a depleção da camada de ozônio (O_3) na estratosfera.

O N_2O é produzido durante os processos microbianos de desnitrificação e nitrificação. A nitrificação é o processo de oxidação do nitrogênio na forma de amônio para nitrato sendo mediado por bactérias quimiotróficas aeróbias. A desnitrificação é o processo de redução biológica do N-nitrato, ou N-nitrito, para N_2O , NO ou até mesmo N_2 . Estes processos são influenciados por muitos fatores, como por exemplo, temperatura, umidade do solo, atividade microbiana e conteúdo de matéria orgânica. A agricultura contribui com as emissões de N_2O em razão de adições de fertilizantes nitrogenados sintéticos, da deposição de dejetos animais, do cultivo de solos orgânicos e minerais e por meio da mineralização da matéria orgânica. No Brasil, os dejetos animais depositados nos solos constituem uma das principais fontes de emissão direta de N_2O , com $143,36 \text{ Gg } N_2O \text{ ano}^{-1}$ e $186,83 \text{ Gg } N_2O \text{ ano}^{-1}$ em 1994 e 2016, respectivamente (Brasil, 2020c), conforme apresentado nas Tabelas 26.1 e 26.2. Somado a outras fontes de óxido nitroso, a evolução das emissões anuais de N_2O no Brasil é representada na Figura 26.7.

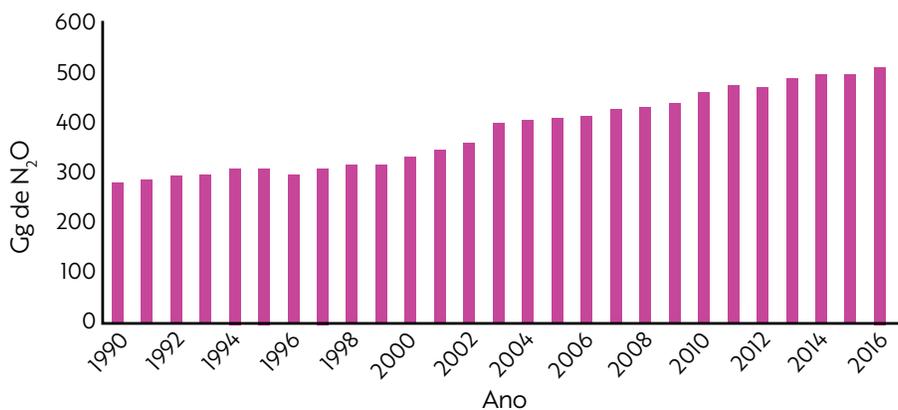


Figura 26.7. Evolução das emissões de N_2O provenientes de atividades antrópicas no Brasil, de 1990 a 2016. Fonte: Brasil (2020d).

Com base nos dados de relatórios de referência da 3ª. Comunicação Nacional, pode-se comparar os dados de CH₄, N₂O, NO_x e CO provenientes dos setores da Agropecuária e da Mudança do uso da terra, de 1990 a 2010, como percentuais do total (Tabela 26.3). A agropecuária apresenta-se como a principal fonte de emissões de CH₄ e de N₂O, enquanto a mudança de uso da terra contribui com maiores emissões de CO e de N₂O.

Tabela 26.3. Percentual das emissões de GEE provenientes da agropecuária e mudança no uso da terra no Brasil nos anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010, com base nos dados da 3ª. Comunicação Nacional.

Anos	Agropecuária		Mudança no uso da terra		Total
	Gg	%	Gg	%	Gg
CH₄					
1990	9.185,6	76,6	1.041,5	8,7	11.993,7
1995	10.058,2	67,6	2.895,7	19,5	14.887,4
2000	10.382,3	70,4	2.048,8	13,9	14.740,8
2005	12.357,7	67,2	3.237,9	17,6	18.397,3
2010	12.415,6	74,4	1.135,5	6,8	16.688,2
N₂O					
1990	303,5	80,6	42,56	11,3	376,33
1995	340,2	70,1	106,98	22,0	485,57
2000	355,9	73,6	81,96	16,9	483,70
2005	429,0	70,3	125,25	20,5	610,06
2010	472,1	84,2	47,08	8,4	560,49
NO_x					
1990	98,6	4,3	526,7	22,8	2.307,2
1995	109,9	3,3	1.196,0	35,8	3.336,6
2000	97,2	2,8	993,8	28,7	3.459,2
2005	126,2	3,1	1.470,3	36,1	4.068,1
2010	171,6	5,0	589,9	17,2	3.429,4
CO					
1990	3.627,6	11,1	8.429,4	56,6	32.550,4
1995	4.045,8	6,4	48.855,6	77,2	63.315,7
2000	3.576,4	7,4	35.879,9	74,1	48.427,8
2005	4.644,4	6,7	55.810,0	80,1	69.671,5
2010	6.313,5	18,0	20.231,4	57,7	35.050,4

CONTRIBUIÇÃO AO PRIMEIRO INVENTÁRIO ESTADUAL DE EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA DIRETOS E INDIRETOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Como desdobramento ao compromisso do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, iniciativas estaduais surgiram também no país, no sentido de assegurar um maior engajamento dos governos estaduais na questão da mudança climática global, como foi o caso dos estados de São Paulo (Cetesb, 2011), Minas Gerais (Minas Gerais, 2008), Acre (Costa; Amaral, 2014), Amazonas (Amazonas, 2010), Bahia (Bahia, 2010), Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2007), Rio Grande do Sul (FEPAM, 2010), entre outros.

A Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) foi instituída pelo Governo do Estado de São Paulo em 2009, pela Lei no. 13.798 de 09 de novembro de 2009 (São Paulo, 2010), sendo regulamentada parcialmente pelo Decreto no. 55.947 de 24 de junho de 2010 (São Paulo, 2010). Ela tem por objetivo estabelecer o compromisso do Estado frente aos desafios das mudanças climáticas globais, bem como dispor sobre as condições para as adaptações necessárias aos impactos derivados das mudanças climáticas e contribuir para reduzir ou estabilizar a concentração de GEE na atmosfera. A Cetesb constitui o órgão responsável pela coordenação dos inventários de emissão de gases de efeito estufa no estado, contando com a participação de várias instituições para a elaboração de relatórios de referência. A Embrapa Meio Ambiente elaborou o relatório de Referência do Setor de Agropecuária como parte integrante do 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeitos Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo, coordenado pelo Programa Estadual de Mudanças Climáticas da Companhia Ambiental do estado de São Paulo - PROCLIMA/Cetesb com o apoio da Embaixada Britânica do Brasil. O relatório (Cetesb, 2015) apresenta estimativas de emissão de gases de efeito estufa com base nas metodologias de inventários do Revised 1996 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Houghton et al., 1996), e no documento *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (Penman et al, 2000) do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC). Os temas abordados no relatório foram cultivo de arroz irrigado por inundação, pecuária e manejo de dejetos animais, solos agrícolas e queima de resíduos agrícolas, para o período de 1990 a 2008. As estimativas de emissão de GEE geradas no primeiro inventário estadual para os anos de 1990 e 2008 são apresentadas na Tabela 26.4. De um total de 678 Gg de emissão de CH₄ estimadas para o setor agropecuário em 2008, que representou 59 % do total estadual, a fermentação entérica de ruminantes contribuiu com 622 Gg de CH₄, o manejo de dejetos com 54,05 Gg, o cultivo de arroz inundado com 2,14 Gg, e a queima de resíduos agrícolas com

0,075 Gg. (Tabela 26.5). Os solos agrícolas contribuíram com emissões de 35,94 Gg de N_2O , representando 95 % do total estadual, sendo que 28,31 Gg foram atribuídas às emissões diretas de N_2O e 7,63 Gg às emissões indiretas. Sistemas de manejo de dejetos contribuíram com 1,86 Gg de N_2O e a queima de resíduos da cana-de-açúcar com 0,004 Gg de N_2O .

Tabela 26.4. Estimativa de emissão de CH_4 , N_2O , CO e N_2O provenientes da agropecuária no Estado de São Paulo em 1990 e 2008 (Cetesb, 2011).

Ano	CH_4	N_2O	CO	NO_x
1990	734	31	1,6	0,1
2008	678	38	1,3	0,1

Tabela 26.5. Estimativa de emissão de CH_4 , N_2O , CO e N_2O provenientes de fontes agropecuárias no Estado de São Paulo em 1990 e 2008 (Cetesb, 2011).

	1990	2008
	Gg	
	CH_4	
Fermentação entérica	689	622
Manejo de dejetos	42,61	54,05
Cultivo de arroz inundado	1,60	2,14
Queima de resíduos agrícolas	0,061	0,075
	N_2O	
Queima de resíduos agrícolas	0,003	0,004
Manejo de dejetos animais	0,956	1,863
Emissões diretas	21,68	28,31
Emissões indiretas	8,12	7,63
	NO_x	
Queima de resíduos agrícolas	1,3	1,6
	CO	
Queima de resíduos agrícolas	0,1	0,1

Posteriormente à elaboração do 1º Inventário do Estado de São Paulo, foram realizadas atualizações para alguns temas, como o cultivo de arroz irrigado por inundação e a queima de resíduos da cana-de-açúcar. No caso das emissões estaduais de metano por cultivo de arroz irrigado foi elaborada uma atualização das estimativas até 2009 (Lima; Villela, 2016). Observa-se pela Figura 26.8 que a área cultivada com arroz irrigado no estado encontra-se atualmente bem restrita, consequentemente afetando as emissões de metano, além de haver uma descontinuidade nas informações censitárias.

Para a queima de resíduos de cana-de-açúcar, observou-se que, apesar de um significativo aumento da área colhida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (205% entre 1990 e 2015) e da produção (207% no mesmo período), houve uma redução de 44,3% nas emissões estimadas de CH_4 , CO , N_2O e NO_x (Figura 26.9), fato atribuído à progressiva diminuição da prática de queima na pré-colheita de cana-de-açúcar no estado (Lima et al., 2016). Esta redução deveu-se principalmente à aplicação da Lei 11.241 de 2002, na qual foi prevista a suspensão da queima dessa cultura em áreas mecanizáveis (terrenos com declividades iguais ou inferiores a 12%) até 2021, conforme mencionado anteriormente, bem como à crescente adoção de equipamentos para colheita de cana crua.

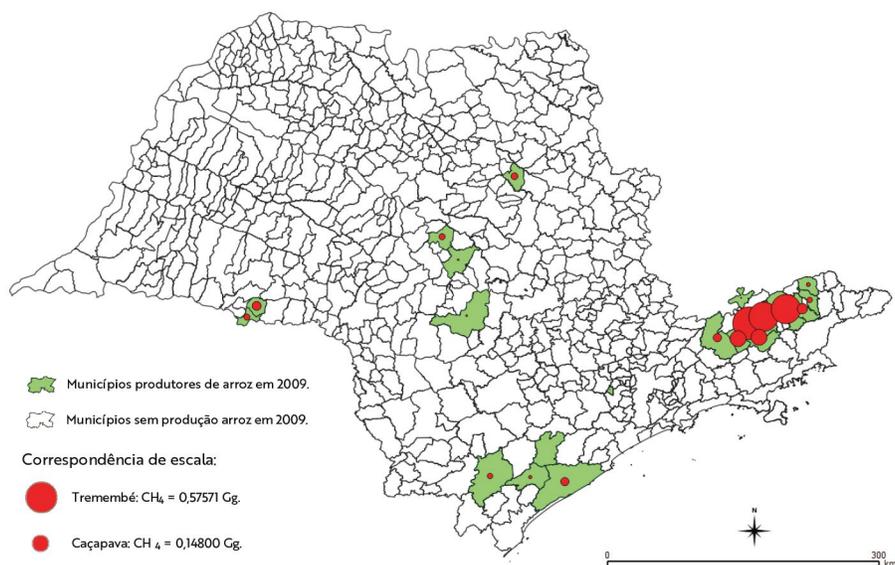


Figura 26.8. Distribuição das emissões de metano por cultivo de arroz irrigado por inundação no Estado de São Paulo no ano de 2009. Os círculos vermelhos representam a área de cultivo, em hectares (Lima; Villela, 2016).

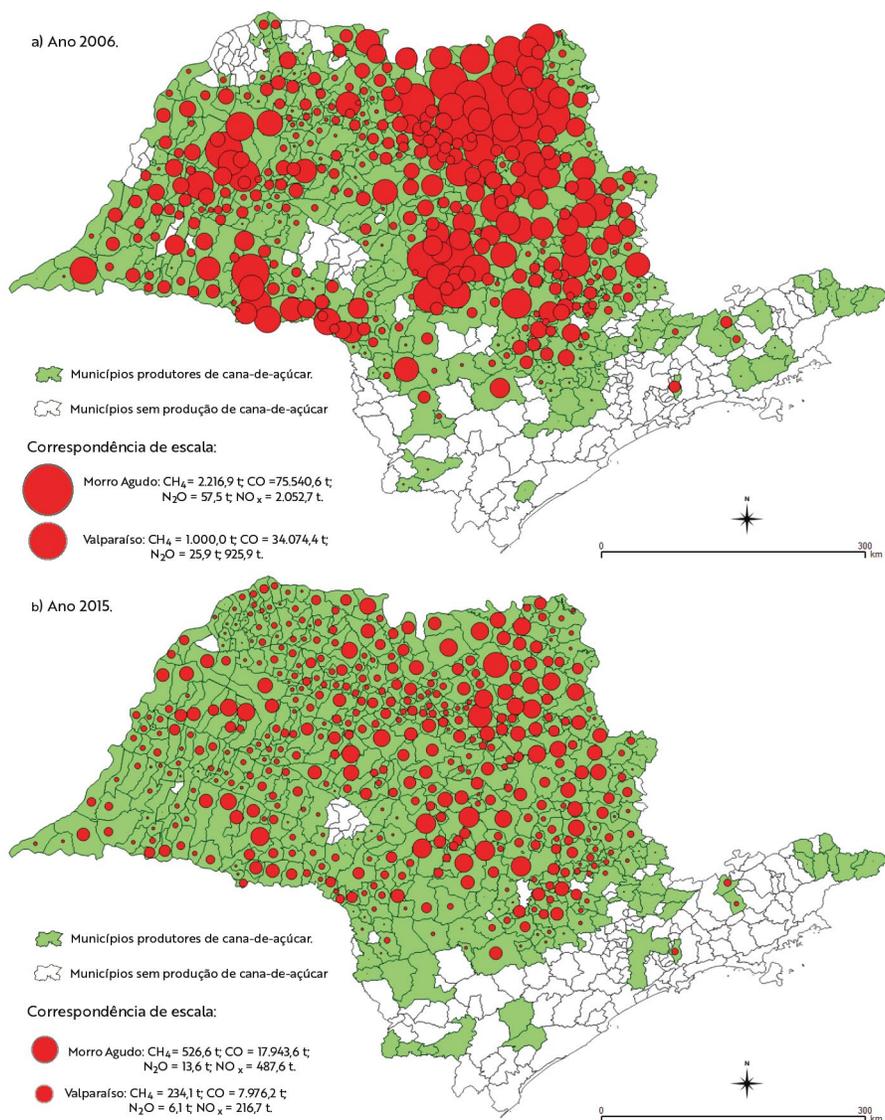


Figura 26.9. Distribuição da emissão municipal de CH_4 , CO , N_2O e de NO_x provenientes da queima de cana-de-açúcar na pré-colheita no Estado de São Paulo no ano de 2006 (a) e de 2015 (b), segundo o método do IPCC-2006. Fonte: Lima et al. (2016).

RESULTADOS DE ESTUDOS DE MENSURAÇÃO DE EMISSÃO DE GASES

Com o objetivo de aprimorar as estimativas de emissão de gases de efeito estufa no setor da agropecuária, a Embrapa Meio Ambiente foi uma das pioneiras em coordenar e desenvolver e estudos voltados a atividades de mensuração local de gases em sistemas de cultivo de arroz irrigado e de produção de bovinos no país.

Para a mensuração de GEE, e em especial do metano, no sistema de cultivo de arroz irrigado, foi iniciado um projeto em 2001 (Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação: quantificação e análise), coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, introduzindo a técnica da câmara fechada adaptada a este cultivo (Figura 26.10). O treinamento da equipe foi feito pelo Dr. Ronald Sass, um dos autores do *Guidelines* do IPCC, de 1996, e foi compartilhada com várias instituições de pesquisa, como a APTA - Polo Regional Vale do Paraíba, a Epagri e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo implantada nos Estados de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os locais de mensuração foram Pindamonhangaba (SP), Tremembé (SP), Itajaí (SC) e Cachoeirinha do Sul e Uruguaiana (RS). Em todas as áreas, foram instaladas passarelas de madeira para permitir a amostragem de gases (Figura 26.11). Como resultado desses estudos, foram gerados fatores de emissão de metano para diferentes tipos de manejo do solo e/ou da água (Tabela 26.6). Seguindo a mesma metodologia, outros estudos foram realizados no país (Figura 26.12). A disponibilidade de fatores de emissão de CH_4 é um elemento chave para a realização de inventários tanto em nível regional como nacional. Em estudo conduzido em sistema pré-germinado por Lima et al. (2019a) foi estimado um fator de emissão de CH_4 de $6,5 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Este fator é cinco vezes maior que o indicado pelo IPCC de $1,3 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Este alto valor demonstra que esforços devem ser direcionados para determinação dos fatores de emissão de CH_4 para os diferentes solos representativos de produção de arroz.



Foto: Magda Aparecida de Lima

Figura 26.10. Câmara de alumínio utilizada para coleta de gases no cultivo de arroz irrigado por inundação.

Foto: Magda Aparecida de Lima



Figura 26.II. Passarelas de madeira para a coleta de amostras de gases em cultivo de arroz irrigado por inundação.

Tabela 26.6. Fatores de emissão de metano (CH_4) em cultivo de arroz irrigado por inundação, por safra e sistema de plantio.

	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2010/11
	(kg CH_4 ha ⁻¹ d ⁻¹)							
Pindamonhangaba, SP								
IC (Tr.)	2,73±0,02	0,69±0,07	1,67±0,19	0,79±0,10	--	--	--	--
II (Tr.)	3,07±0,97	0,45±0,17	--	--	--	--	--	--
PG	--	--	--	--	--	--	--	2,27 ^{***}
Cachoeirinha, RS								
PC	3,07 [†]	--	--	--	--	--	--	--
PD	2,55 [†]	--	--	--	--	--	--	--
Itajaí, SC								
PG_SM	--	--	--	--	4,68	3,70/4,63 ^{**}	--	--
PG_SO	--	--	--	--	9,40	4,09 [†] / -- ^{**}	--	--
SSS_SM	--	--	--	--	--	-- [†] /2,98 ^{**}	--	--
Tremembé, SP								
PG	--	--	--	--	--	--	6,2	--

IC = Manejo contínuo de água; II = Manejo intermitente de água; Tr = sistema de transplântio; PG = sistema pré-germinado; PG_SM = sistema pré-germinado em solo mineral; PG_SO = sistema pré-germinado em solo orgânico; SSS_SM = Sistema de plantio em solo seco, e posterior irrigação, em solo mineral; [†]Experimento 1; ^{**}Experimento 2; [†]Média de duas safras. Em vermelho: dados publicados em Lima et al., 2014; em azul: Lima et al., 2019a; em verde: Eberhardt et al., 2009; em roxo: Lima et al., 2007; em marrom: Lima et al., 2019b.



Figura 26.12. Áreas de estudo de mensuração de gases de efeito estufa no Brasil, utilizando o método de câmara fechada, no Brasil.

Com o mesmo objetivo de aprimorar estimativas nacionais e regionais de emissão de gases de efeito estufa, estudos foram conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente, em parceria com a Embrapa Pecuária Sudeste, Instituto de Zootecnia e Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Jaboticabal, em sistemas de produção de bovinos de leite e de corte.

Dada a importância de grandes ruminantes, como os bovinos, na produção pecuária brasileira, reuniu-se um conjunto de parcerias para a mensuração e determinação da emissão de metano gerando os primeiros fatores de emissão obtidos sob condições de campo no país. O projeto inicial (Influência do manejo da produção animal sobre a emissão de metano em bovinos de corte - Convênio 01.0052.00/2001,

MCT/Embrapa/FAT/APTA), coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, foi responsável pela introdução da técnica do traçador SF_6 (Figura 26.13) no início de 2001, por meio de uma parceria estabelecida com a *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, que incluiu o treinamento da equipe pelos desenvolvedores da técnica (Dr. Kristen Johnson e Dr. Hal Westberg, da *State Washington University*).

Os experimentos realizados por este grupo de pesquisadores resultaram no estabelecimento de fatores de emissão de metano de origem entérica por bovinos de corte e de leite (Tabelas 26.7 e 26.8). Estes fatores de emissão encontram-se atualmente publicados na Base de Dados de Fatores de Emissão de Gases de Efeito Estufa (EFDB) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), a partir de 2020¹.

Foto: Magda Aparecida de Lima



Figura 26 13. Implantação da técnica do traçador interno SF_6 para a mensuração de metano ruminal pela equipe da Embrapa Meio Ambiente, em parceria à Embrapa Pecuária Sudeste e Instituto de Zootecnia em 2001.

Esta técnica foi recentemente adaptada e amplamente adotada por várias instituições de pesquisa no país em diferentes áreas experimentais para mensuração de metano em bovinos de corte e de leite (Figura 26.14) e de ovinos e caprinos (Figura 26.15), gerando grande número de fatores de emissão de metano por bovinos, caprinos e ovinos.

¹ Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef_id.php



Figura 26.14. Áreas experimentais utilizando a técnica do traçador interno SF_6 para mensuração de metano em sistemas de produção de gado de corte e de leite no país.



Figura 26.15. Áreas experimentais utilizando a técnica do traçador interno SF_6 para mensuração de metano em sistemas de produção de gado de corte e de leite no país.

Tabela 26.7. Fatores de emissão de metano (kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹) para fermentação entérica de gado de corte.

Descrição do sistema	Fator de emissão	Referência
Bovinos mestiços adultos com 80% de feno de capim de <i>Cynodon dactylon</i> , cultivar <i>coast-cross</i> , com 20% de <i>Leucaena</i> , sem levedura.	53,86	Possenti et al., 2008.
Bovinos mestiços com 50% de feno de gramíneas do cultivar <i>coast-cross</i> de <i>Cynodon dactylon</i> , com 50% de <i>Leucaena</i> , sem fermento.	47,04	
Bovinos mestiços adultos com 80% de feno de gramíneas, 20% de <i>Leucaena</i> e 10% de levedura.	49,17	
Bovinos mestiços adultos com 50% de feno de capim, 50% de <i>Leucaena</i> e 10% de levedura.	51,72	
Novilhos Nelore de 18 meses no inverno (estação seca).	37,41	Demarchi et al., 2016.
Novilhos Nelore de 18 meses na estação da primavera (estação chuvosa).	48,18	
Novilhos Nelore de 18 meses no verão (estação chuvosa).	80,63	
Novilhos Nelore de 18 meses no outono (estação seca).	58,39	
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (15 dias).	48,55	Primavesi et al., 2004.
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (45 dias).	48,91	
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (90 dias).	50,37	
Silagem de tanino inferior sorgo + ureia (LTSU).	18,08	Oliveira et al., 2007.
Silagem de tanino inferior sorgo + concentrado (LTSC).	24,32	
Silagem de tanino alto sorgo + ureia (HTSU).	17,98	
Silagem de tanino superior de sorgo + concentrado (HTSC).	25,71	
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 0% de concentrado (Consumo de matéria seca: 5,5 kg.dia ⁻¹), em confinamento.	45,70	Pedreira et al., 2013.
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 30% de concentrado (Consumo de matéria seca: 7,9 kg.dia ⁻¹), sob confinamento.	54,71	
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 60% de concentrado (Consumo de matéria seca: 8,7 kg.dia ⁻¹), em confinamento.	51,25	

Tabela 26.7. Fatores de emissão de metano (kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹) para fermentação entérica de gado de leite citados em Pedreira et al., 2009.

Descrição do sistema	Fator de emissão (kg animal ⁻¹ ano ⁻¹)
Bovinos leiteiros adultos (Holstein-vacas em lactação) e produção média de leite de 22,7 L d ⁻¹ no verão, mantidos em pastagem de capim-tanzânia (<i>Panicum maximum</i> Jacq. Cv. Tanzânia), fertilizados com 400 kg ha ⁻¹ de N e K ₂ O cada um dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 1 kg de concentrado para cada 3 L de leite.	147,17
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços Leiteiros, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas em lactação e produção média de leite de 13,3 L d ⁻¹ , no verão, mantidas em pastagem de capim-braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk), sob as mesmas condições de fertilidade do solo da pastagem de capim Tanzânia. Suplementado diariamente com 3,4 kg de concentrado por vaca.	121,40
Bovinos leiteiros adultos (Holstein - vacas secas) na temporada de verão, mantidos em pastagem de capim-Tanzânia (<i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Tanzânia), fertilizados com 400 kg ha ⁻¹ de N e K ₂ O cada dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 2 kg de concentrado por animal.	102,20
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços Brasileiros de Leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas secas, na temporada de verão, mantidas em pastagem de capim-tanzânia (<i>Panicum maximum</i> Jacq. Cv. Tanzânia), fertilizada com 400 kg ha ⁻¹ de N e K ₂ O cada um dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 2 kg de concentrado por animal.	107,49
Novilhas leiteiras (Holandesa), no verão, em pastagem adubada com suplementação (sistema intensivo).	81,10
Novilhas leiteiras (Mestiço Leiteiro Brasileiro, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no verão, em pastagem adubada com suplementação (sistema intensivo).	84,90
Novilhas leiteiras (Holandesa), no verão, em pastagem de capim-braquiária, não fertilizada e não suplementada com concentrado (sistema extensivo).	72,42
Novilhas leiteiras (Mestiço Leiteiro Brasileiro, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no verão, em pastagem de capim-braquiária, não fertilizada e não suplementada com concentrado (sistema extensivo).	66,07
Bovinos leiteiros adultos (Holandês - Vacas em lactação) e produção média de leite de 24,3 L d ⁻¹ no outono, alimentados com silagem de milho, 10 kg de matéria seca animal ⁻¹ dia ⁻¹ .	139,87
Bovinos leiteiros adultos (mestiços de leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas em lactação e produção média de leite de 9,7 L d ⁻¹ , no outono, alimentadas com milho picado, 8 kg MS animal ⁻¹ dia ⁻¹ , mantendo a mesma dieta concentrada de seu rebanho específico, ajustada à capacidade de produção e necessidades diárias.	108,15
Gado leiteiro adulto (Holstein - vacas secas), no outono, pastagem de capim-tanzânia fertilizado.	95,37
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços: Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas secas, no outono, pastando capim-Tanzânia fertilizado.	87,02
Novilhas leiteiras (Holstein), no outono, em pastagem de capim-tanzânia fertilizada (sistema intensivo).	89,43
Novilhas leiteiras (Mestiço: Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no outono, em pasto fertilizado de capim-tanzânia (sistema intensivo).	69,57
Novilhas leiteiras (Holandesa), no outono, em pastagem de capim-braquiária não fertilizada e sem suplementação (sistema extensivo).	57,38
Novilhas leiteiras (Mestiço Brasileiro de Leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no outono, em pastagem de capim braquiária não fertilizada e sem suplementação (sistema extensivo).	65,81

Obs. Os estudos utilizaram a técnica de mensuração do gás traçador de hexafluoreto de enxofre (SF₆), conforme descrito por Johnson et al. (1994, 2007) e adaptado por Primavesi et al. (2004).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os relatórios de referência elaborados para os inventários periódicos de emissão de gases de efeito estufa no país constituem uma importante ferramenta de política ambiental, servindo de referência para iniciativas estaduais e para a gestão de recursos naturais no âmbito das cadeias produtivas. O IPCC tem aprimorado periodicamente sua metodologia de elaboração de inventários, e um conjunto cada vez maior de informações e dados de parâmetros específicos a cada atividade agropecuária é cada vez mais demandado. Em função disto, a série histórica de emissões é ajustada, podendo diferir numericamente das estimativas iniciais.

A realização de estudos de mensuração de emissão de gases no âmbito da agropecuária brasileira tem fornecido um conjunto extraordinário de informações para muitos dos setores de produção, tendo como um dos importantes resultados a proposição de novos fatores de emissão de gases em diferentes sistemas de produção, de cultivo e de manejo de solo. As redes de pesquisa Agrogases, Pecos, Fluxus e Saltus, coordenadas pela Embrapa produziram uma extensa base de dados obtidos a partir de mensurações locais e estimativas de fluxos de gases no país, somadas as pesquisas de várias instituições, como a USP, UFRGS, entre outras. Os próximos relatórios poderão contar com um acervo representativo de fatores de emissão de gases, disponibilizados em grande parte nas Coletâneas dos fatores de emissão e remoção de GEE da agricultura e da pecuária brasileira (Brasil, 2020a, 2020b), bem como em outras fontes de dados (Alves et al., 2014). Tais coletâneas deverão também apoiar o processo de revisão do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC).

A utilização do nível metodológico *Tier 3* deverá cada vez mais ser uma opção interessante para a elaboração dos inventários nacionais à medida que se disponha de dados de fatores de emissão e de parâmetros essenciais relativos às atividades agropecuárias para diferentes regiões e sistemas de produção existentes no país. Do mesmo modo, será possível elaborar meta-análises nacionais para as diferentes fontes de emissão de gases.

REFERÊNCIAS

ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M. de; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F.; SANTOS, H. P.; CARVALHO, C. J. R. Emissions of soil nitrous oxide and nitric oxide in Brazilian agricultural systems. In: BODDEY, R. M.; LIMA, M. A. de; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Chapter 5.

AMAZONAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Centro Estadual de Mudanças Climáticas. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor elétrico do Estado do Amazonas: 2002-2008**. Manaus: [SDS], 2010. 102 p.

BAHIA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado. **Primeiro inventário de emissões antrópicas de gases do efeito estufa do Estado da Bahia**. [Salvador: SEMA], 2010. 7 p.

BONT, J. A. M.; LEE, K. K.; BOULDIN, D. F. Bacterial oxidation of methane in a rice paddy. *Ecological Bulletin Stockholm*, v. 26, p. 91-96, 1978.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020a. 162 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020b. 147 p.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Comunicação nacional inicial do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2004. 274 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**, volume 1. Brasília, DF, 2010. 280 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta comunicação nacional do Brasil a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020c. 622 p. Disponível em: https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4782/1/2020_quarta_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima.pdf. Acesso em: 17 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta comunicação nacional do Brasil a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020d. 516 p. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/SIRENE/Comunicacoes-Nacionais-do-Brasil-a-UNFCCC/2020_12_22_4CN_v5_PORT_publicada.pdf. Acesso em: 17 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima: sumário executivo**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010. 41 p.

CETESB. **Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo, 1: comunicação estadual**. 2.ed. - São Paulo: CETESB, 2011. 192 p.

CETESB. 1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo: emissões do setor de agropecuária. São Paulo, 2015. 174 p.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** Brasília, 2018. v.5 – Safra 2018/19 – n. 1. CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (ed.). **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

COSTA, F. de S.; AMARAL, E. F. de (ed.). **Inventário de emissões antrópicas e sumidouros de gases de efeito estufa do estado do Acre: ano-base 2012.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. 98 p.

DEMARCHI, J. J. A. DE A.; MANELLA, M. Q.; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R.; FRIGHETTO, R. T. S.; ROMERO, L. A.; BERNDT, A.; LIMA, M. A. Effect of seasons on enteric methane emissions from cattle grazing *Urochloa brizantha*. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 8, n. 4, p. 106-115, 2016.

EBERHARDT, D. S.; LIMA, M. A. de; ANDRADE, S. A. L. de; PESSOA, M. C. P. Y.; NOLDIN, J. A.; OLIVEIRA, L. C. de. Emissão de metano em arroz irrigado em Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6, 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, v. 1, p. 163-166. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/578037/emissao-de-metano-em-arroz-irrigado-em-santa-catarina>. Acesso em: 30 abr. 2019.

EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.** Japan: IPCC/IGES, 2006. 5 v. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 14 maio 2020.

FEPAM. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa do Rio Grande do Sul 2005.** Porto Alegre, 2010. 58 p. Disponível em: http://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/30/2014/04/Inventario_GEE_RS_2005_PACE_RS_2010_FEPAM.pdf. Acesso em 24 fev. 2016.

GAROFALO, D. F. T.; PACKER, A. P. C.; RAMOS, N. P.; KONDO, V. K.; FOLEGATTI, M. I. S.; CABRAL, O. M. R. Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018. **Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente**, 2020. 41 p.

GAVRILOVA, O.; LEIP, A.; DONG, H.; MACDONALD, J. D.; GOMEZ BRAVO, C. A.; AMON, B.; BARAHONA ROSALES, R.; PRADO, A. del; LIMA, M. A. de; OYHANTÇABAL, W.; WEERDEN, T. J. van der; WIDIAWATI, Y. Emissions from livestock and manure management. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROSHENKO, Y. SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (Ed.). **Refinement to the 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories.** Agriculture, forestry and other land use. Geneve: IPCC, 2019. v. 4. cap. 10. p. 10.9-10.167.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; LIM, B.; TRÉANTON, K.; MAMATY, I.; BONDUKI, Y.; GRIGGS, D. J.; ALLANDER, B. A. (ed.). **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse inventories.** Paris: IPCC/OECD/IEA, 1996. 3 v. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invsi.html>. Acesso em: 8 set. 2020.

JOHNSON, K.; HUYLEY, M.; WESTBERG, H.; LAMB, B.; ZIMMERMAN, P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique. **Environmental Science Technology**, v. 28, n. 2, p. 359–362, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00051a025>.

JOHNSON, K.; WESTBERG, H.; MICHAL, J.; COSSALMAN, M. (2007) The SF₆ tracer technique: methane measurement from ruminants. In: MAKKAR, H.P.; VERCOE, P.E. (ed.). **Measuring methane production from ruminants**. Dordrecht: Springer, 2007. Chapter 3, p. 33-67. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6133-2_3.

LIMA, M. A. de, EBERHARDT, D. S., PESSOA, M. C. P. Y., FRIGHETTO, R. T. S.; NOLDIN, J. A.; VALÉRIO NETO, S.; PLEC, D. F.; MALBURG, L. C.; PINHEIRO, G.F.; OLIVEIRA, D. N. S.; BACCAN, M. Emissão de metano em lavouras de arroz irrigado sob sistema pré-germinado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5., 2007, Pelotas. **Anais... Pelotas: Embrapa Clima Temperado**, 2007. v. 1. p. 417-419, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/15997/emissao-de-metano-em-lavouras-de-arroz-irrigado-sob-sistema-pre-germinado>. Acesso em: 17 abr. 2019.

LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; VILLELA, O. V.; COSTA, F. de S.; BAYER, C.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Methane emissions in flooded rice cultivation. In: BODDEY, R. M. et al. (ed.). **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Chapter 6.

LIMA, M. A. de; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. **Gases de efeito estufa da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: 1990 a 2015**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 107).

LIMA, M. A. de; VIEIRA, R. F.; FRIGHETTO, R. T. S.; LUIZ, A. J. B.; VILLELA, O. V. Methane emission from a flooded rice field under pre-germinated system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 11, e20190336, 2019a.

LIMA, M. A. de; VIEIRA, R. F.; LUIZ, A. J. B.; GALVÃO, J. A. H.; VILLELA, O. V. **Emissão de metano em área de arroz irrigado sob sistema pré-germinado em Pindamonhangaba, SP, Jaguariúna, SP**: Embrapa Meio Ambiente, 2019b. 22 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 86).

LIMA, M. A. de; VILLELA, O. **Estimativa de Emissão de Metano Proveniente da Cultura de Arroz Inundado no Estado de São Paulo**: Aplicação do Método do IPCC de 2006. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 35 p. (Documentos, 103).

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2008. 120 p.

MYHRE, G. D.; SHINDELL, F.-M. (coord.). Anthropogenic and natural radiative forcing. In: **CLIMATE CHANGE 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 82 p.

NEUE, H.-U. Methane Emission from Rice Fields: Wetland rice fields may make a major contribution to global warming. **BioScience**, v.43, n.7, p.466-474, July/Aug.1993. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1311906>. Acesso em: 20 dez. 2020.

OLIVEIRA, S. G.; BERCHIELLI, T. T.; PEDREIRA, M. S.; PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.; LIMA, M. A. de. Effect of tannin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestibility and methane emission in beef cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 135, n. 3-4, p. 236-248, 2007.

PEDREIRA, M. dos S.; OLIVEIRA, S. G. DE; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R.; LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; BERCHIELLI, T. T. Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in beef cattle fed different dietary concentrate levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, n. 1, p. 592-598, 2013.

PEDREIRA, M. dos S.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R.; OLIVEIRA, S. G. de; BERCHIELLI, T. T. Ruminant methane emission by dairy cattle in southeast Brazil. *Scientia Agricola*, v. 66, n. 6, p. 742-750, Nov./Dec. 2009.

PENMAN, J.; KRUGER, D.; GALBALLY, I.; HIRAISHI, T.; NYENZI, B.; ENMANUEL, S.; BUENDIA, L.; HOPPAUS, R.; MARTINSEN, T.; MEIJER, J.; MIWA, K.; TANABE, K. (ed.). **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Hayama, Japan: IPCC/OECD/IEA/IGES, Chapter 4, 2000. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

POSSENTI, R. A.; FRANZOLIN, R.; SCHAMMAS, E. A.; DEMARCHI, J. J. A. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; LIMA, M. A. de. Efeitos de dietas contendo *Leucaena leucocephala* e *Saccharomyces cerevisiae* sobre a fermentação ruminal e a emissão de gás metano em bovinos. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. 8, p. 1509-1516, 2008.

PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.T.S.; PEDREIRA, M. S.; LIMA, M.A.; BERCHIELLI, T.T.; BARBOSA, P.F. Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 3, p. 277-283, mar. 2004.

RIO DE JANEIRO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, COPPE/CLIMA. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2007. 307 p.

SÃO PAULO. Decreto nº 55.947, 24 de junho de 2010. Regulamenta a Lei nº13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. Diário Oficial [do] Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, 25 maio 2010. Seção 1, v. 120, n. 119, p. 1-5. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2010/decreto-55947-24.06.2010.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SAUNOIS, M.; STAVERT, A. R.; POULTER, B.; BOUSQUET, P.; CANADELL, J. G.; JACKSON, R. B.; RAYMOND, P. A.; DLUGOKENCKY, E. J.; HOUWELING, S.; PATRA, P. K.; CIAIS, P.; ARORA, V. K.; BASTVIKEN, D.; BERGAMASCHI, P.; BLAKE, D. R.; BRAILSFORD, G.; BRUHWILER, L.; CARLSON, K. M.; CARROL, M.; CASTALDI, S.; CHANDRA, N.; CREVOISIER, C.; CRILL, P. M.; COVEY, K.; CURRY, C. L.; ETIOPE, G.; FRANKENBERG, C.; GEDNEY, N.; HEGGLIN, M. I.; HÖGLUND-ISAKSSON, L.; HUGELIUS, G.; ISHIZAWA, M.; ITO, A.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; JENSEN, K. M.; JOOS, F.; KLEINEN, T.; KRUMMEL, P. B.; LANGENFELDS, R. L.; LARUELLE, G. G.; LIU, L.; MACHIDA, T.; MAKSYUTOV, S.; MCDONALD, K. C.; MCNORTON, J.; MILLER, P. A.; MELTON, J. R.; MORINO, I.; MÜLLER, J.; MURGUIA-FLORES, F.; NAIK, V.; NIWA, Y.; NOCE, S.; O'DOHERTY, S.; ROBERT J. PARKER, R. J.; PENG, C.; PENG, S.; PETERS, G. P.; CATHERINE PRIGENT, C.; PRINN, R.; RAMONET, M.; REGNIER, P.; RILEY, W. J.; ROSENTRER, J. A.; SEGERS, A.; SIMPSON, I. J.; SHI, H.; STEVEN J. SMITH, S. J.; STEELE, L. P.; THORNTON, B. F.; TIAN, H.; TOHJIMA, Y.; TUBIELLO, F. N.; TSURUTA, A.; VIOVY, N.; VOULGARAKIS, A.; THOMAS S. WEBER, T. S.; WEELE, M. VAN; WERF, G. R. VAN DER; WEISS, R. F.; WORTHY, D.; WUNCH, D.; YIN, Y.; YOSHIDA, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, Z.; ZHAO, Y.; ZHENG, B.; ZHU, Q.; ZHU, Q.; ZHUANG, Q. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, v. 12, p. 1561–1623, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>. Acesso em: 15 abr. 2020.

TIAN, H., XU, R., CANADELL, J.G. et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, v. 586, p. 248–256, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>. Acesso em: 3 ago. 2021.

USSIRI, D., LAL, R. *Soil emission of nitrous oxide and its mitigation*. Rotterdam: Springer Dordrecht, 2013. p. 378.