

Artigo

Emissões de N₂O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça

Lopes, I. M.; *Pinheiro, E. F. M.; Lima, E.; Ceddia, M. B.; Campos, D. V. B, Alves, B. J. R.

Rev. Virtual Quim., 2017, 9 (5), 1930-1943. Data de publicação na Web: 31 de agosto de 2017

<http://rvq.sbq.org.br>

Emissions of N₂O in Soils under Sugarcane Cultivation in the Atlantic Forest biome: Effect of Harvesting Systems and Vinasse Fertilization

Abstract: The conversion of areas under natural vegetation to agricultural areas is one of the major sources of greenhouse gas (GHG) emissions. The reason for the increase in GHG emissions is not only due to the loss of plant biomass but also to the greater decomposition of soil organic matter (SOM) due to agricultural management practices (fertilization, irrigation, residues burning, and mechanization). The objective of the study was to quantify nitrous oxide gas (N₂O) flux in two traditional sites with sugarcane production, one with different straw management before harvest (burnt and unburnt) in Linhares (ES) and another one with different fertilization management (with and without vinasse application) in Campos dos Goytacazes (RJ), both sites inserted in the Brazilian Atlantic forest biome. The experiment carried out in Linhares, evaluated in October 2007 in an experimental area at the LAGRISA Plant had as treatments: sugarcane harvesting after straw burning (burnt) and cane harvesting without straw burning (unburnt) and surface straw distribution from soil. In the experiment conducted in Campos dos Goytacazes, evaluated in July 2008 treatments consisted of sugarcane without vinasse and with vinasse fertilization (single dose of 150 m³ ha⁻¹). The N₂O emission assessments were performed with static chambers, with six replicates per treatment, in both study areas. The N₂O fluxes in Linhares site were not high, presenting a weekly average of ranging from 1.91 to 2.87 µg m⁻² h⁻¹ for the burnt and unburnt systems, respectively. The highest loss of N₂O to the atmosphere occurred decreasingly from two days after the nitrogen fertilization together with the coverage of the residues in the raw cane system. In the Campos dos Goytacazes experimental site, the application of vinasse potentialized N₂O flow, presenting high values (195 µg m⁻² h⁻¹) only in five hours after vinasse fertilization. The treatment without vinasse presented flow values close to zero (0.4 µg m⁻² h⁻¹), in the same gas sampling. After four days of vinasse application, there was no difference between treatments for N₂O fluxes. The amount of organic matter easily assimilated to soil microorganisms, the increased in soil humidity due to vinasse addition and the precipitation occurring soon after vinasse fertilization were probably the most important variables in the control and magnitude of N₂O emissions.


Keywords: Nitrous oxide; greenhouse gases flux; management of sugarcane straw; vinasse.

Resumo

A conversão de áreas sob vegetação natural para áreas agrícolas é uma das maiores fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE). O motivo do aumento da emissão de GEE não é somente devido a perda da biomassa vegetal decorrente da queima e preparo das áreas para o plantio, mas também pela maior decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) decorrente das práticas de manejo agrícola (fertilização, irrigação, queima de resíduos culturais e mecanização). O objetivo deste estudo foi quantificar o fluxo do gás óxido nitroso (N₂O) em duas áreas tradicionais de cultivo de cana-de-açúcar, uma com diferentes manejos da palhada perante a colheita (cana queimada e cana crua) em Linhares (ES) e outra área com diferentes manejos de adubação (com e sem aplicação de vinhaça) em Campos dos Goytacazes (RJ), ambas inseridas no bioma Mata Atlântica do Brasil. O experimento conduzido em Linhares, avaliado em outubro 2007 na área experimental na Usina LAGRISA teve como tratamentos: corte da cana após a queima da palhada (cana queimada) e corte da cana sem a queima da palhada (cana crua) e com distribuição da palha na superfície do solo. Já no experimento conduzido em Campos dos Goytacazes, avaliado em julho de 2008 os tratamentos consistiram de cana sem adubação de vinhaça e cana com adubação de vinhaça (dose única de 150 m³ ha⁻¹). As avaliações das emissões de N₂O foram realizadas com câmaras estáticas com seis repetições por tratamento em ambas as áreas de estudo. Os valores de fluxo de N₂O em Linhares não foram elevados, apresentando uma média semanal de 1,91 e 2,87 µg m⁻² h⁻¹ para os sistemas cana queimada e cana crua, respectivamente. A maior perda de N₂O para a atmosfera ocorreu de forma decrescente a partir de dois dias após a adubação nitrogenada aliada à cobertura dos resíduos no sistema cana crua. Já na área experimental de Campos dos Goytacazes, a aplicação de vinhaça potencializou o fluxo de N₂O apresentando valores elevados (195 µg m⁻² h⁻¹) cinco horas após a adubação. O tratamento sem aplicação de vinhaça apresentou valores de fluxo próximos a zero (0,4 µg m⁻² h⁻¹), na mesma coleta. Após quatro dias da adubação com vinhaça não houve mais diferença no fluxo de N₂O entre os tratamentos avaliados. A quantidade de matéria orgânica facilmente assimilável para os microrganismos do solo, o aumento da umidade do solo devido à adição da vinhaça e a precipitação ocorrida logo após a adubação foram, provavelmente, as variáveis mais importantes no controle e na magnitude das emissões de N₂O.

Palavras-chave: Óxido nitroso; emissão de gases de efeito estufa; manejo da palha da cana; vinhaça.

* Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, CEP 23890-000, Seropédica-RJ - Brasil.

 erika.solos@gmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20170113](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170113)

Emissões de N₂O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça

Iara Maria Lopes,^a Érika Flávia M. Pinheiro,^{a,*} Eduardo Lima,^a Marcos B. Ceddia,^a David V. B. de Campos,^b Bruno José Alves^c

^a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, CEP 23890-000, Seropédica-RJ - Brazil.

^b Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Solos, Centro Nacional de Pesquisa em Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ - Brazil.

^c Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Agrobiologia, BR 465, km 7, Seropédica, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

* erika.solos@gmail.com

Recebido em 28 de agosto de 2017. Aceito para publicação em 28 de agosto de 2017

1. Introdução

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

2.2. Amostragem

2.3. Determinação da concentração de N₂O

2.4. Análise dos dados

3. Resultados e Discussão

3.1. Emissão de N₂O e manejo da palhada da cana-de-açúcar em Linhares (ES)

3.2. Emissão de N₂O e aplicação de vinhaça na cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes (RJ)

4. Conclusões

1. Introdução

O etanol de cana-de-açúcar é considerado a melhor alternativa para substituição de combustíveis fósseis, pois emite até 80% menos de gases de efeito estufa (GEE).¹ O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp* L.) com,

aproximadamente, 8,7 milhões de hectares de área cultivada.² Atualmente, a queima dos canaviais tem sido cada vez menos comum, principalmente por questões ambientais. No estado de São Paulo, na safra de 2015/2016, cerca de 3,46 milhões de hectares (mais de 90% da área total) foram colhidos sem queima reduzindo a emissão de poluentes prejudiciais à saúde humana e a emissão de

GEE responsáveis pelas mudanças climáticas.³ Contudo, nos estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro com, aproximadamente, 78 e 97 mil hectares de área com cana-de-açúcar, respectivamente,⁴ a abolição total da queima só está prevista para 2020 no estado do ES (Lei nº 5.990/2011)⁵ e em 2024 no RJ (Lei nº 9.073/2008)⁶. Assim, nesses dois estados ainda ocorre a queima da palhada em boa parte dos canaviais.

Essas áreas tradicionais no cultivo da cana-de-açúcar estão inseridas no bioma Mata Atlântica do Brasil, onde a agricultura e pecuária foram responsáveis por grande parte do desmatamento. A intensa atividade agropecuária se deve a inserção dessas áreas na feição geológica Tabuleiros costeiros, que se caracteriza por apresentar solos profundos e de baixa fertilidade, mas situados em regiões de topografia plana, tabulares, que facilita a mecanização. O setor de mudança de uso da terra com a substituição da vegetação de mata nativa para áreas sob agricultura e/ou pecuária é o maior responsável pela emissão de GEE no país. No relatório feito pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), "Estimativas Anuais de Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil", referentes ao período de 2010 a 2014, o setor mudanças de uso da terra e florestas mostrou uma queda de 33,2% na emissão de GEE.⁷ Além da diminuição dos desmatamentos, uma alternativa à redução de GEE é a mudança nas práticas agrícolas, como por exemplo, a redução da queimada. A adoção de práticas de manejo adequadas no sistema solo-planta-atmosfera, que visam à manutenção ou mesmo o acúmulo de carbono no solo contribuem na diminuição da emissão de GEE, o que pode resultar em um balanço geral (entrada x saída) mais baixo e até mesmo negativo de emissão de GEE na agricultura, graças a menor emissão desses gases aliado ao maior estoque de C no solo.^{8,9}

A queima da palhada é realizada com a finalidade de facilitar a colheita da cana-de-açúcar. Porém, a ausência da queimada resulta num aporte anual de 10 a 20 Mg ha⁻¹ de massa seca de palhada sobre a superfície

do solo.¹⁰ A preservação da palhada promove vários benefícios agrônômicos, além de favorecer a retenção de água e promover o balanço de nutrientes no solo, também aumenta a diversidade de organismos no solo e mitiga a emissão de GEE, principalmente CO₂, N₂O e CH₄. Bordonal e colaboradores afirmam que a conversão do sistema com queima para o sem queima da palhada da cana-de-açúcar aliado ao menor revolvimento do solo são práticas responsáveis em diminuir a emissão de GEE.⁸ Esses autores, verificaram que a queima da palhada emite, em média, 883,6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq e deixa de acumular no solo 888,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq. Além disso, os autores também observaram que o preparo reduzido do solo mitiga 201,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de CO₂eq quando comparado ao preparo convencional.

Dentre os GEEs, destaca-se o óxido nitroso que possui um potencial de aquecimento global 298 vezes maior que o CO₂,¹¹ sendo responsável por, aproximadamente, 30% do total de GEE em CO₂ eq emitido pelo setor agropecuário no ano de 2015 no Brasil.¹² A conversão do uso da terra para sistemas agrícolas com queima dos resíduos agrícolas aumenta potencialmente a emissão de N₂O.¹³ A emissão desse gás é oriunda dos processos microbiológicos que ocorrem nos solos: nitrificação e desnitrificação. 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 N₂O, NO ou até mesmo N₂. Esse processo ocorre simultaneamente ao processo de mineralização do N-orgânico no solo.¹⁴ A desnitrificação juntamente com a volatilização da amônia, constituem as mais importantes vias de perdas gasosas de nitrogênio no solo. Os principais fatores que interferem na emissão de N₂O são: umidade, temperatura, presença de oxigênio, teores disponíveis de carbono orgânico e de nitrogênio e a relação C/N do solo.¹⁵ A ocorrência natural desses processos nos solos de florestas tropicais e os estímulos realizados no manejo dos solos agrícolas pela larga adição de fertilizantes minerais

nitrogenados resultam nestes ambientes como maiores fontes de emissão de N_2O .¹⁶ Além dos fertilizantes minerais, a adubação orgânica é outro fator responsável pela perda de N_2O . A aplicação de vinhaça, fertilizante orgânico produzido pelas usinas sucroalcooleiras, nas áreas de cana-de-açúcar através da irrigação é uma prática bastante adotada. Essa adubação tem sido realizada devido ao elevado conteúdo de potássio na vinhaça, porém, esse fertilizante orgânico estimula a produção de N_2O através da saturação dos poros do solo e do aumento da oferta de Carbono lábil. Estudos realizados em áreas com aplicação de vinhaça, bem como nos canais escoadouros, têm comprovado que a vinhaça contribui substancialmente na emissão de GEE, em especial de N_2O e CH_4 .¹⁷⁻²⁰

Segundo Oliveira e colaboradores,¹⁹ um volume aplicado de $200\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ de vinhaça adiciona ao solo em torno de 46 Kg ha^{-1} de N, o que aumenta a liberação de N_2O resultando em fatores de emissão de 0,68 e 0,44 % nas áreas com e sem queima da palha, respectivamente. Além disso, quando os fluxos de N_2O e CH_4 são convertidos em $CO_2\text{eq ha}^{-1}$, a aplicação de $1\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ de vinhaça emite 0,491 e 0,314 kg de $CO_2\text{eq}$ nas áreas com e sem queima, respectivamente. Os fatores de emissão de N_2O são calculados com base na diferença do somatório da emissão total de N_2O da câmara nos tratamentos que recebem N mineral ou orgânico em relação ao somatório do tratamento controle (sem N mineral e orgânico) dividido pela quantidade de N aplicado na câmara.¹⁸

O objetivo do estudo foi quantificar a emissão de óxido nitroso sob diferentes sistemas de colheita e adubação com vinhaça, em duas áreas tradicionais no cultivo da cana-de-açúcar na região de Mata Atlântica do Brasil sendo uma área com diferentes sistemas de manejo da palhada perante a colheita (cana queimada e cana crua) em Linhares-ES e a outra com diferentes manejos de adubação orgânica (com e sem aplicação de vinhaça) em Campos

dos Goytacazes-RJ.

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

O trabalho foi conduzido em duas áreas experimentais. Uma área experimental pertencente à LAGRISA (Linhares Agrícola S/A), no município de Linhares, no Estado do Espírito Santo. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo Distrófico, com textura arenosa. O experimento foi instalado em 28/05/1989 visando um estudo de longa duração dos sistemas de corte da cana-de-açúcar. Para tal, após a retirada da mata secundária fez-se o plantio da variedade de cana RB 73-9735 que apresenta porte ereto e fácil despalha, características que facilitam o corte e a colheita da cana em sistema sem queima.

A adubação no plantio foi de 500 kg ha^{-1} do adubo formulado 0,4-20-20, sendo 2 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, 100 kg ha^{-1} de K_2O na forma de cloreto de potássio e 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato simples, respectivamente. Nos anos seguintes (1990-1996), sempre após as colheitas, foi realizada a adubação das soqueiras com 500 kg ha^{-1} do adubo formulado 20-0-30, sendo 100 kg ha^{-1} de N na forma de ureia e 150 kg ha^{-1} de K_2O na forma de cloreto de potássio, distribuídos uniformemente sobre a palhada.

Os tratamentos avaliados foram: a) corte da cana após a queima da palhada (cana queimada - CQ) e b) corte da cana sem a queima da palhada e com distribuição desta na superfície do solo (cana crua - CC) (Figura 1).

A outra área experimental foi conduzida na Estação Experimental da UFRRJ no Campus Leonel Miranda em Campos dos Goytacazes, no Estado do Rio de Janeiro. A área experimental vem sendo cultivada com cana-de-açúcar desde 1981. No momento da

instalação do experimento a área estava cultivada com cana da variedade RB85- 5536. O solo é classificado como Cambissolo. A adubação no plantio foi de 500 kg ha⁻¹ do adubo formulado 0,4-20-20, sendo 2 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, 100 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples, respectivamente. Nos anos seguintes, após as colheitas, foram realizadas a adubação das soqueiras com 500 kg ha⁻¹ do adubo formulado 20-0-30, sendo 100 kg ha⁻¹ de N na

forma de ureia e 150 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, distribuídos uniformemente.

Os tratamentos avaliados foram: a) cana adubada com vinhaça (CV) – nesse tratamento foi realizada a adubação orgânica da cana-de-açúcar com uma única aplicação de 150 m³ ha⁻¹ (0,2 % de N) de vinhaça e, b) cana sem adubação com vinhaça (SV) – nesse tratamento não foi aplicada a vinhaça como adubo orgânico.

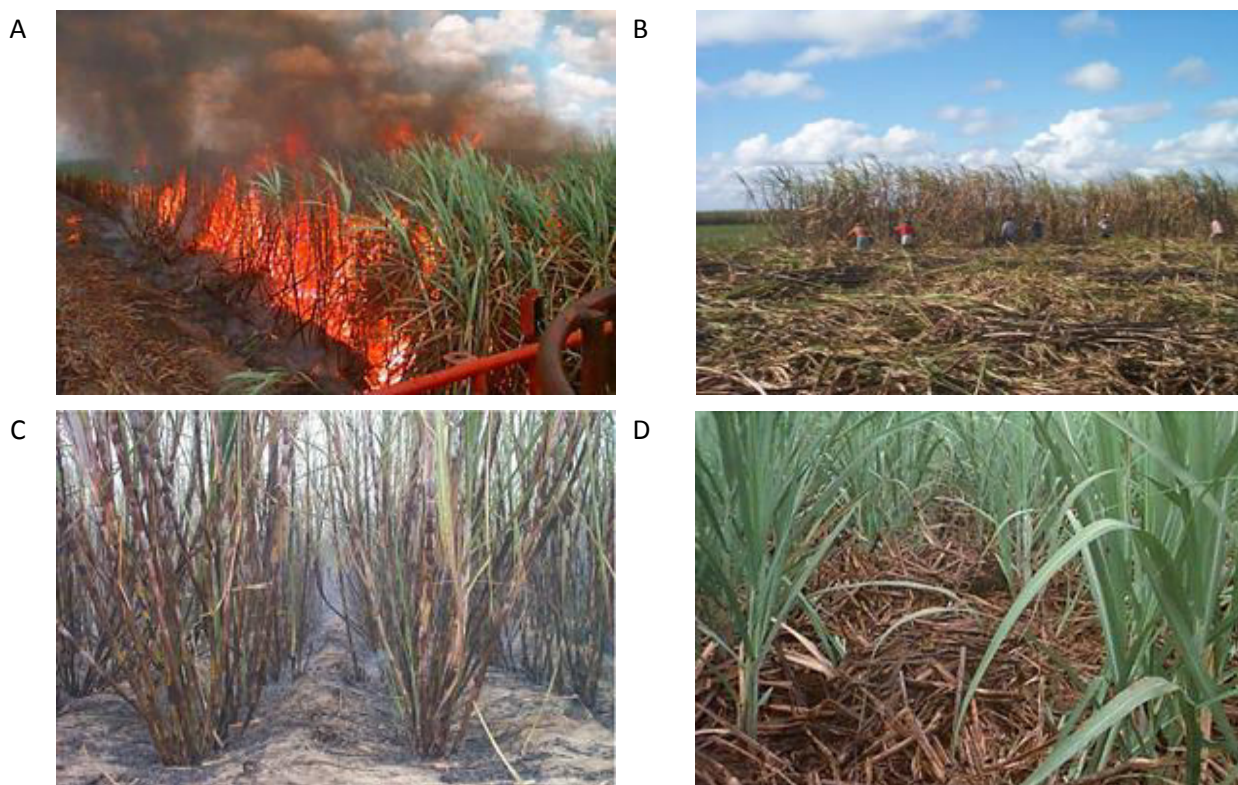


Figura 1. Detalhe dos sistemas de colheita cana queimada e crua (A e B) e do respectivo aporte de palhada na superfície do solo (C e D)

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com seis repetições para cada tratamento em ambas as áreas de estudo (Linhares-ES e Campos dos Goytacazes-RJ).

2.2. Amostragem

Nas duas áreas de estudo foram instaladas câmaras estáticas especialmente construídas

em cada parcela experimental para a amostragem do fluxo de N₂O. As câmaras foram posicionadas na linha de plantio da cana-de-açúcar. Cada câmara era composta por uma base retangular de 30 x 25 cm de metal, inserida no solo até 5 cm de profundidade (Figura 2). Em cada amostragem, a base era coberta com uma tampa de metal com as mesmas dimensões de largura e espessura da base de metal, e selada com grampos de carpinteiro.

As amostras foram coletadas com auxílio de seringas de nylon de 20 mL sendo o gás diretamente transferido para frascos (selados com rolhas de borracha butírica, recravados com lacres de alumínio) previamente submetidos a vácuo. O vácuo foi realizado com auxílio de um vacuômetro manual até atingir uma pressão de -80 Kpa. O intervalo entre a coleta e a análise dos gases não ultrapassou dez dias pois, testes realizados

na Embrapa Agrobiologia, com padrão de 500 ppbv de N_2O demonstraram que os frascos utilizados mantinham a concentração inicial do gás por até 15 dias.²¹ No momento da coleta do gás também foram determinadas a temperatura do solo e do ar com auxílio de um termômetro digital. As medidas foram realizadas uma vez ao dia sempre no período da manhã.



Figura 2. Detalhe da câmara instalada na linha de plantio da cana-de-açúcar e do coletor do gás na parte central da tampa

Em Linhares-ES retirou-se uma amostra do gás N_2O um dia antes e cinco dias após a adubação mineral, no período entre 22 e 27 de outubro de 2007. Para a coleta do gás foi retirada uma amostra inicial, logo após o fechamento da câmara (t_0) e após 15 minutos de fechamento da câmara (t_1).

Em Campos dos Goytacazes-RJ também foi feita uma coleta do gás um dia antes da adubação orgânica com vinhaça (4 de julho de 2008). No entanto, a segunda coleta ocorreu, excepcionalmente, no mesmo dia (04/07/08) no período da tarde (cinco horas após a adubação) devido à elevada precipitação ocorrida. As demais amostragens do gás N_2O ocorreram nos dias 5, 7 e 8 de julho de 2008.

Imediatamente após a coleta do gás N_2O

foi avaliada a umidade do solo (U), a densidade do solo (ds) e a densidade da partícula do solo (dp) na camada superficial do solo (0-20 cm em Linhares-ES e 0-10 cm em Campos dos Goytacazes-RJ), segundo a metodologia da Embrapa.²² Posteriormente foi calculado o espaço poroso saturado por água (% EPSA = $(U \times ds) / (1 - (ds/dp))$), em que: U é a umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$); ds é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e dp é a densidade de partículas do solo ($g\ cm^{-3}$), conforme proposto por Paul & Clark.²³

2.3. Determinação da concentração de N_2O

Os frascos com as amostras do gás N_2O

foram enviados para análise no Laboratório de Solos da Embrapa Agrobiologia. Antes de cada conjunto de análises, foram injetadas amostras do padrão de concentração conhecida de N₂O (312 ppbv, 400 ppbv, 800 ppbv, 1120 ppbv e 10000 ppbv) para o cálculo das concentrações de N₂O em cada amostra. A concentração de N₂O foi determinada por cromatografia gasosa (Perkin Elmer, Auto system XL, Wellesley, MA, USA), utilizando-se uma coluna empacotada com Porapak Q e um detector de captura de elétrons. Os fluxos de N₂O foram calculados pela equação: $N_2O = \delta C / \delta t \times V / A \times M / V_m$,²⁴ em que: o fluxo de N₂O é expresso em $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$; $\delta C / \delta t$ é a variação da concentração de N₂O (ppbv), entre t₀ e t₁ (hora); V é o volume da câmara (m³); A é a área da câmara (m²); M é a massa atômica de N na molécula de N₂O (mg); e V_m é o volume molecular na temperatura de amostragem (dm³).

2.4. Análise dos dados

As comparações entre os tratamentos cana queimada e cana crua no experimento em Linhares (ES) e entre a cana adubada ou não com vinhaça foram realizadas através da análise de variância com aplicação do teste F (p<0,05), utilizando o programa estatístico Sistema para Análises Estatísticas e Genéricas (SAEG), versão 5.0.²⁵ Também foram apresentados os resultados do erro-padrão da média, considerando as seis repetições (n = 6).

3. Resultados e Discussão

3.1. Emissão de N₂O e manejo da palhada da cana-de-açúcar em Linhares-ES

Os valores de fluxo de N₂O comparando os diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar estão apresentados na Figura 2. Pode-se observar que as emissões de N₂O não foram elevadas e não diferiram estatisticamente entre os tratamentos avaliados, apresentando uma média semanal de 1,91 e 2,87 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ de N₂O para os sistemas de colheita cana queimada e cana crua, respectivamente. Um dia antes da adubação, o sistema de manejo sem a queima do canavial apresentou os menores fluxos de N₂O quando comparado com o sistema cana queimada (Figura 3).

A maior perda de N₂O ocorreu três dias após a adubação no sistema cana crua (dia 25/10), sendo estatisticamente significativa a diferença entre os sistemas de colheita (p<0,05). O uso do fertilizante nitrogenado aliado à cobertura dos resíduos culturais resultou em maiores emissões de N₂O do solo para a atmosfera no sistema cana crua.

Estudos comprovam que as maiores emissões de N₂O no solo se concentram após a adubação nitrogenada nos períodos de maiores precipitações.^{26,27} Quando os solos não apresentam condições limitantes de disponibilidade de N e o espaço poroso saturado por água é maior que 60%,²⁸ ocorre o predomínio do processo de desnitrificação, onde NO₃⁻ é reduzido a N₂O.

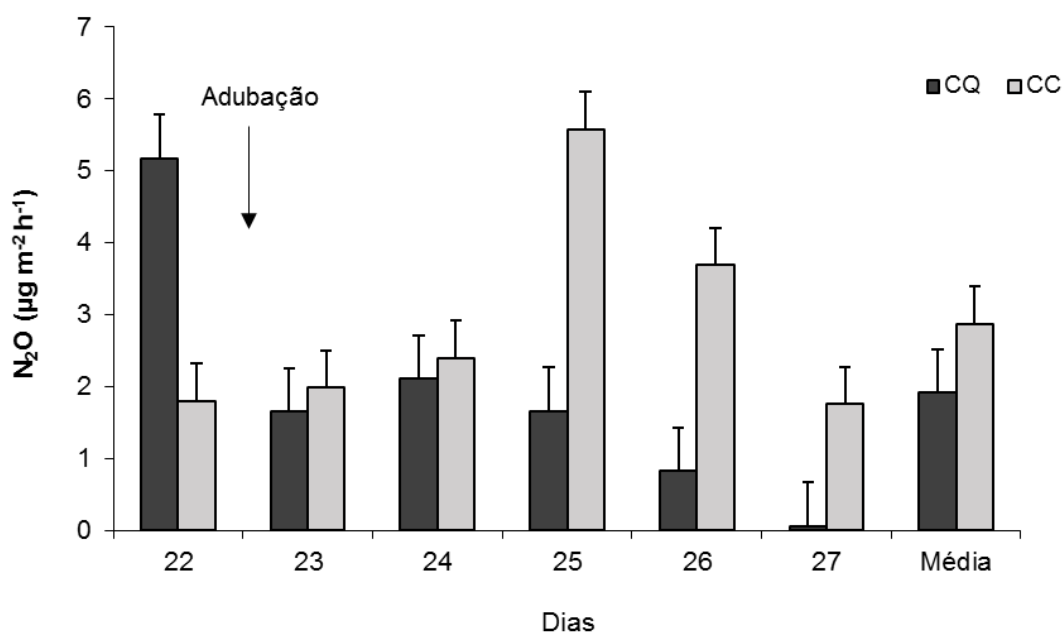


Figura 3. Fluxo de N₂O (µg m⁻² h⁻¹) antes e após a adubação sob diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar, em Linhares (ES). CQ: cana queimada e CC: cana crua (sem queima). As barras verticais, em cada avaliação, representam o erro padrão da média (n=6)

O espaço poroso saturado por água (EPSA) médio, referente aos dias de coleta do gás, não diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) entre os sistemas de colheita da cana-de-açúcar (Figura 4). Esse resultado está provavelmente associado ao curto espaço de tempo de implantação dos tratamentos (com queima e sem queima) e também devido à ausência de chuva no período de avaliação. Os fluxos de N₂O verificados nesse estudo, considerados relativamente baixos, podem estar relacionados ao baixo EPSA e a textura arenosa do solo Argissolo Amarelo que promovem uma baixa retenção de água nesse solo.

Os maiores fluxos de N₂O nas áreas de cana-de-açúcar sem queima e com a manutenção de toda a palhada sobre o solo ocorrem em razão da palhada conservar a umidade do solo por mais tempo e, além disso, por beneficiar a atividade microbiana do solo, resultando em maior decomposição da palhada e conseqüentemente maior

liberação de C solúvel que favorece o processo de desnitrificação.^{20,29} Assim, a manutenção da palhada sobre o solo, principalmente, quando em maiores quantidades aumenta a emissão de N₂O quando comparado ao tratamento sem palha.^{20,29}

Num estudo realizado por Carmo e colaboradores²⁰ no município de Piracicaba-SP, com diferentes deposições de palha da cana-de-açúcar sobre o solo (0, 7, 14 e 21 Mg ha⁻¹) e com e sem a aplicação de vinhaça (56 m³ ha⁻¹), os autores observaram que na área sem vinhaça a aplicação do adubo mineral potencializou a emissão de N₂O, em especial no tratamento com maior quantidade de palhada sobre o solo (4000 g ha⁻¹ ano⁻¹ de N₂O), sendo praticamente o dobro do valor emitido no tratamento sem palha (aproximadamente 2000 g ha⁻¹ ano⁻¹ de N₂O). Os autores verificaram ainda que no tratamento sem palha e sem adubação os valores emitidos ficaram próximos de zero.

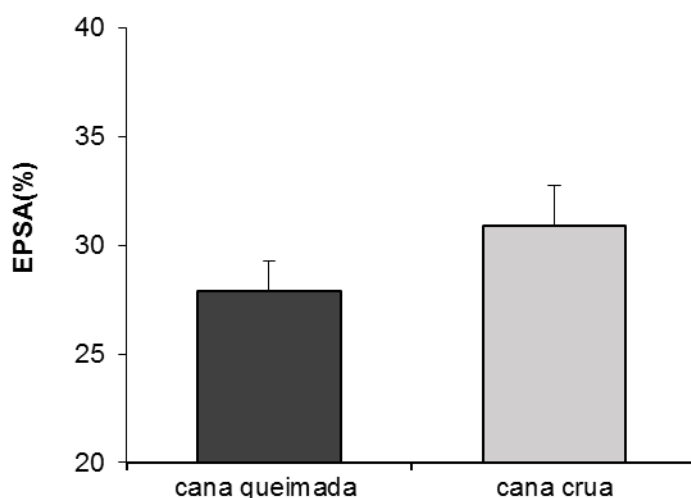


Figura 4. Espaço poroso saturado por água -EPSA (%) na camada de 0-20 cm, nos diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar em um Argissolo Amarelo, em Linhares (ES). As barras verticais representam o erro padrão da média (n=6)

Constatou-se no presente estudo que os fluxos de N_2O apresentaram elevada variabilidade, refletidos através dos coeficientes de variação. Observou-se ainda fluxos negativos de N_2O (*i.e.*, fluxos de N_2O da atmosfera para o solo). Os valores variaram entre 7,52 e 11,74 $\mu g m^{-2} h^{-1}$ de N_2O . Vários trabalhos também observaram fluxos negativos de N_2O , esses fluxos são frequentes e substanciais e não podem ser simplesmente atribuídos ao erro experimental.³⁰⁻³²

Na literatura, Blackmer & Bremner mostraram que alguns solos têm maior capacidade de capturar N_2O da atmosfera do que liberá-lo,³⁰ o que sustenta fortemente essa hipótese do solo como fonte de N_2O proveniente da atmosfera. Aproximadamente 18% dos valores de fluxo de N_2O observados nesse estudo foram negativos, apesar de não apresentar nenhuma média com valor negativo (Figura 3).

Os valores de fluxos de N_2O negativos foram reportados por diversos trabalhos, os quais relatam que os estudos disponíveis não enfatizam esses dados como sendo uma propriedade importante em vários sistemas.^{31,32} Em torno de 30-40% dos dados

observados durante uma coleta de gás N_2O numa estação úmida na Amazônia brasileira foram negativos. Esses fluxos negativos de N_2O estão relacionados a baixas concentrações de N inorgânico, oxigênio, conteúdo de água e temperatura do solo.^{31,32}

3.1. Emissão de N_2O e aplicação de vinhaça na cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes-RJ

Os valores de fluxo de N_2O comparando a aplicação ou não de vinhaça no canavial estão apresentados na Figura 2. Como resultados, pode-se observar que antes de adubar com vinhaça, no tempo inicial (dia 4), os valores de fluxos de N_2O eram baixos, próximos a zero. Entretanto, um dia após a adubação (dia 4) os valores de fluxo de N_2O foram bastante elevados no tratamento que recebeu a aplicação de vinhaça (150 $m^3 ha^{-1}$). Este tratamento apresentou um fluxo de 195 $\mu g m^{-2} h^{-1}$ de N_2O cinco horas após a aplicação da vinhaça sendo estatisticamente significativo ($p=0,05$) ao tratamento sem aplicação de vinhaça que apresentou valores de fluxo próximos ao zero (0,4 $\mu g m^{-2} h^{-1}$) nesta mesma coleta (Figura 5). Esse resultado

corroborar com o estudo de Siqueira Neto e colaboradores, os quais também observaram um valor próximo desse ($200 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) porém, somente dois dias após a aplicação de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sobre a palha da cana-de-açúcar em Piracicaba-SP.¹⁸

A maior perda de N_2O foi observada cinco horas após a adubação com vinhaça (dia 4). No segundo dia após a adubação (dia 7) já se observou uma acentuada queda do fluxo de N_2O e a partir desse dia não houve nenhuma diferença no fluxo de N_2O entre os tratamentos avaliados, passando a valores negativos no dia 8 (Figura 5). Como base na média do fluxo de N_2O no período avaliado, pode-se observar que a adubação com vinhaça estimulou o fluxo de N_2O ($38,15 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) em relação à cana não adubada com vinhaça ($-2,46 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) (Figura 5).

Siqueira Neto e colaboradores,¹⁸ ao compararem o fluxo médio de N_2O (trinta dias de avaliação) após a aplicação de diferentes quantidades de vinhaça (150 e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) sobre a palha da cana-de-açúcar e $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça associada a adubação mineral com 80 Kg ha^{-1} de N (fonte: ureia) em relação ao controle (sem vinhaça e sem adubação mineral), em Piracicaba-SP, observaram fluxos médios de N_2O de $97,3$, $125,5$, $212,6$ e $41,9 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para os tratamentos 150 , $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça, $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça mais 80 Kg ha^{-1} de N e controle, respectivamente. O que comprova que a aplicação de vinhaça nos canaviais, sobretudo de vinhaça e N mineral, aumenta em 507% a emissão de N_2O em relação ao controle (sem vinhaça e sem adubação mineral).

Em outro estudo no município de Piracicaba-SP, com aplicação de vinhaça (56

$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) sobre diferentes deposições de palha da cana-de-açúcar sobre o solo (0 ; 7 ; 14 e 21 Mg ha^{-1}) e com tratamento controle sem palha e sem adubação mineral ou orgânica, Carmo e colaboradores,²⁰ verificaram que a aplicação de adubação mineral e principalmente a adubação orgânica (vinhaça) potencializa bastante a emissão de N_2O . Os valores observados na área com 21 Mg ha^{-1} de palha e com vinhaça foi em torno de $7.400 \text{ g ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N_2O , ou seja, 85% maior que a área com 21 Mg ha^{-1} de palha porém sem vinhaça ($4.000 \text{ g ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N_2O). Oliveira e colaboradores,¹⁷ também observaram que a aplicação de vinhaça ($200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) principalmente nas áreas sem queima da palha em relação as áreas com queima, potencializam a emissão de N_2O , resultando em fatores de emissão de $0,68$ e $0,44\%$, nas áreas com e sem queima da palha, respectivamente.

As emissões de N_2O em solos agrícolas estão fortemente associadas à fertilização nitrogenada. Trabalhos realizados em condições de clima temperado mostram uma relação linear entre a quantidade de fertilizante nitrogenado aplicado e as emissões de óxido nitroso.^{36,37} Observa-se também que o manejo da palha sobre o solo, a aplicação de vinhaça e N mineral, favorecem a maior emissão de N_2O nos sistemas de produção de cana-de-açúcar. Contudo, é importante ressaltar que áreas que mantêm a palha da cana-de-açúcar sobre o solo o balanço geral de emissão de GEE são mais baixos em aproximadamente $2.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2eq , graças ao sequestro de C no solo e a menor emissão pela ausência da queima.^{7,8,33-35}

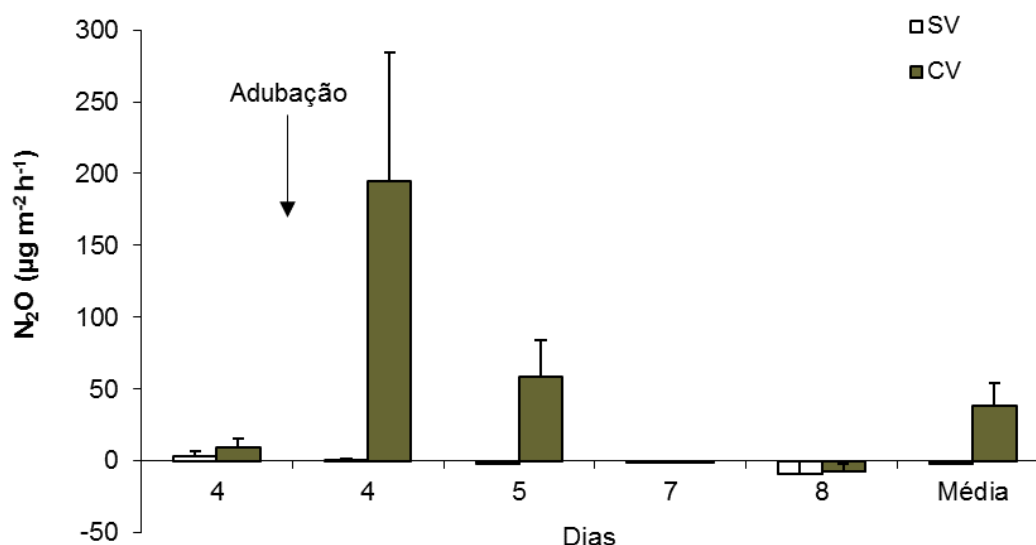


Figura 5. Fluxo de N₂O (µg m⁻² h⁻¹) sob cobertura de cana-de-açúcar com e sem a adubação com vinhaça em Cambissolo, em Campos dos Goytacazes (RJ). SV: sem vinhaça; CV: com vinhaça. As barras verticais, em cada avaliação, representam o erro padrão da média (n=6)

A umidade do solo (grau de saturação de água no solo) causa grande influência nas emissões de N₂O. No primeiro dia após adubação com vinhaça, quando foi observada a maior perda de N₂O, o solo sob cana adubada com vinhaça apresentava, aproximadamente, 89% do espaço poroso saturado com água (EPSA) (Figura 6). Além da vinhaça adicionada ao solo o que também contribuiu para a elevação da umidade do solo foi a precipitação ocorrida. O solo sob cana sem adubação com vinhaça apresentou 58% EPSA. Em condições de solo com baixos valores de espaço poroso do solo saturado com água, a nitrificação é processo responsável pela emissão de N₂O. Em condições de alta saturação do solo com

água, a desnitrificação passa a ser o processo mais importante. Os solos com saturação dos poros com água inferior a 60-65%, os fluxos de N₂O são bastante baixos, sendo os maiores fluxos, observados em níveis de saturação próximos de 80-85%.^{37,38}

A umidade do solo pode explicar as maiores perdas de N₂O ocorridas sob cana-de-açúcar após a adubação com vinhaça. Além disso, o teor de nitrogênio na vinhaça utilizada para a adubação da cana foi muito baixo, 0,2% N. Como os organismos quimiorganotróficos, em condições de anaerobiose, utilizam formas oxidadas de nitrogênio para a oxidação do carbono, a disponibilidade de carbono lábil é essencial para a ocorrência do processo.

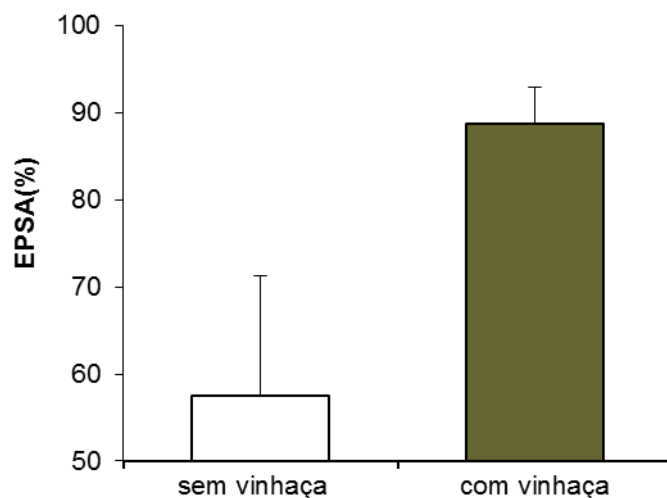


Figura 6. Espaço poroso saturado por água (EPSA) (%), na camada de 0-10 cm, em área com cana-de-açúcar com e sem adubação com vinhaça, em outubro de 2007, em Campos dos Goitacazes (RJ). As barras verticais representam o erro padrão da média (n=6)

4. Conclusões

A manutenção da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, bem como a adubação com vinhaça, favoreceu maiores emissões de N_2O nos sistemas de produção de cana-de-açúcar, na região de Mata Atlântica do Brasil.

O fluxo de N_2O na área experimental localizada em Linhares (ES) apresentou valores decrescentes a partir do terceiro dia após aplicação do fertilizante mineral, o que refletiu num valor médio semanal de 1,91 e 2,87 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$ para os sistemas cana queimada e cana crua, respectivamente.

A maior emissão de N_2O em Campos dos Goitacazes ocorreu cinco horas após a aplicação de vinhaça (195 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$ de N_2O), apresentando uma redução três dias depois da adubação. Dessa forma, conclui-se que o uso da vinhaça nos canais deve ser feito com cautela, principalmente, nos períodos chuvosos, visando evitar maiores perdas de nitrogênio do solo para a atmosfera.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos Geraldo, Gilson e Carminto da Estação Experimental da UFRRJ em Campos dos Goitacazes (Campus Leonel Miranda), à Usina LASA, ao CPGA-CS, a FAPERJ, a CAPES, o CNPq e a Embrapa Agrobiologia pelo apoio técnico e financeiro.

Referências Bibliográficas

- 1 Macedo, I. C.; Seabra, J. E. A.; Silva, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy* **2008**, 32, 582. [CrossRef]
- 2 Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Área Plantada de Cana-de-Açúcar, maio, 2017. [Link]
- 3 Etanol Verde. Relatório da Safra 2015/2016 do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, 2016. [Link]

- ⁴ CANASAT - Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra, 2017. [Link]
- ⁵ Lei 5990/11, de 20 de junho de 2011. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá outras providências no estado do Rio de Janeiro. [Link]
- ⁶ Lei nº 9.073, 2008, de 05 de dezembro de 2008. Dispõe sobre a eliminação gradativa da prática de queimadas nas colheitas de cana-de-açúcar e dá outras providências no estado do Espírito Santo. [Link]
- ⁷ Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC): "Estimativas Anuais de Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil", referentes ao período de 2010 a 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2016/12/governo-publica-novos-dados-de-emissao-de-gases-de-efeito-estufa>>. Acesso em: 2 agosto 2017.
- ⁸ Bordonal, R. O.; de Figueiredo, E. B.; La Scala, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. *Global Change Biology Bioenergy* **2012**, *4*, 846. [CrossRef]
- ⁹ Jiang, C. M.; Yu, W. T.; Ma, Q.; Xu, Y. G.; Zou, H. Alleviating global warming potential by soil carbon sequestration: A multi-level straw incorporation experiment from a maize cropping system in Northeast China. *Soil & Tillage Research* **2017**, *170*, 77. [CrossRef]
- ¹⁰ Schultz, N.; Lima, E.; Pereira, M. G.; Zonta, E. Adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2010**, *34*, 811. [CrossRef]
- ¹¹ Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. In: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contributions of Working Group I of the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A.), pp. 239-288. Cambridge University Press, Cambridge. [Link]
- ¹² Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG): Emissões totais, setor agropecuário no ano de 2015. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emissao>. Acesso em: 2 agosto 2017.
- ¹³ ¹³ Carvalho, J. L. N.; Avanzi, J. C.; Silva, M. L. N.; de Mello, C. R.; Cerri, C. E. P. Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **2010**, *34*, 277. [CrossRef]
- ¹⁴ Bouwman, A.F. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*, **1998**, *392*, 866. [CrossRef]
- ¹⁵ Signor, D.; Pissioni, L. L. M.; Cerri, C. E. P. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. *Bragantia* **2014**, *73*, 113. [CrossRef]
- ¹⁶ Smith, K. A.; Conen, F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use and Management* **2004**, *20*, 255. [CrossRef]
- ¹⁷ Oliveira, B. G.; Carvalho, J. L. N.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C.; Feigl, B. J. Greenhouse gas emissions from sugarcane vinasse transportation by open channel: a case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *94*, 102. [CrossRef]
- ¹⁸ Siqueira-Neto, M.; Galdos, M. V.; Feigl, B.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C. Direct N₂O emission factors for synthetic N-fertilizer and organic residues applied on sugarcane for bioethanol production in Central-southern Brazil. *Global Change Biology Bioenergy* **2015**, *8*, 269. [CrossRef]
- ¹⁹ Oliveira, B. G.; Carvalho, J. L. N.; Cerri, C. E. P.; Cerri, C. C.; Feigl, B. J. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. *Geoderma* **2013**, *77*, 200. [CrossRef]
- ²⁰ Carmo, J. B.; Filoso, S.; Zotelli, L. C.; de Sousa Neto, E. R.; Pitombo, L. M.; Duarte Neto, P. J.; Vargas, V. P.; Andrade, C. A.; Gava, G. J. C.; Rossetto, R.; Cantarella, H.; Neto, A. E.; Martinelli, L. A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *Global Change Biology Bioenergy* **2013**, *5*, 267. [CrossRef]

- ²¹ Giacomini, S. J.; Jantalia, C. A.; Urquiaga, S. S.; Alves, B. J. R. Emissão de óxido nitroso com a aplicação de dejetos líquidos de suínos em solo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **2006**, *41*, 1653. [[Link](#)]
- ²² EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed., rev. Atual. Rio de Janeiro, 2012 p., 1997.
- ²³ Paul, E. A.; Clark, F. E.; *Soil microbiology and biochemistry*. 2nd ed. California: Academic Press, 340p., 1996.
- ²⁴ Rochette, P.; Bochove, E. van; Prévost, D.; Angers, D.A.; Côté, D.; Bertrand, N. Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year. 2. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* **2000**, *64*, 1396. [[CrossRef](#)]
- ²⁵ Euclides, R. F. SAEG: sistema para análises estatísticas e genéticas. Versão 5.0. Viçosa: UFV, 1983.
- ²⁶ Jantalia, C. P.; dos Santos, H. P.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M.; Alves, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **2008**, *82*, 161. [[CrossRef](#)]
- ²⁷ Martins, M. R.; Jantalia, C. P.; Polidoro, J. C.; Batista, J. N.; Alves, B. J. R.; Boddey, R. M.; Urquiaga, S. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. *Soil Tillage Research* **2015**, *151*, 75. [[CrossRef](#)]
- ²⁸ Dobbie, K. E.; Smith, K. A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. *Global Change Biology* **2003**, *9*, 204. [[CrossRef](#)]
- ²⁹ Vargas, V. P.; Cantarella, H.; Martins, A. A.; Soares, J. R.; do Carmo, J. B.; De Andrade, C. A. Sugarcane Crop Residue Increases N₂O and CO₂ Emissions Under High Soil Moisture Conditions. *Sugar Tech* **2014**, *16*, 174. [[CrossRef](#)]
- ³⁰ Blackmer, A. M.; Bremner, J. M. Potencial of soil as a sink for atmospheric nitrous oxide. *Geophysical Research Letters* **1976**, *3*, 739. [[CrossRef](#)]
- ³¹ Verchot, L. V.; Davidson, E. A.; Cattânio, J. I. L.; Ackerman, I. L.; Erickson, I. L. E.; Keller, M. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* **1999**, *13*, 31. [[CrossRef](#)]
- ³² Chapuis-Lardy, L.; Wrage, N.; Metay, A.; Chottes, J.; Bernouxs, M. Soils, a sink for N₂O? A Review. *Global Change Biology* **2007**, *13*, 1. [[CrossRef](#)]
- ³³ Galdos, M. V.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma* **2009**, *153*, 347. [[CrossRef](#)]
- ³⁴ Pinheiro, E. F. M.; Lima, E.; Ceddia, M. B.; Urquiaga, S.; Alves, B. J. R.; Boddey, R. M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant and Soil* **2010**, *333*, 71. [[CrossRef](#)]
- ³⁵ Thorburn, P. J.; Meier, E. A.; Collins, K.; Robertson, F. A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil and Tillage Research* **2012**, *120*, 99. [[CrossRef](#)]
- ³⁶ Baggs, E. M.; Rees, R. M.; Smith, K. A.; Vinten, A. J. A. N₂O emission from soils after incorporating crop residues. *Soil Use and Management* **2000**, *16*, 82. [[CrossRef](#)]
- ³⁷ Duxbury, J. M.; Bouldin, D. R.; Terry, R. E.; Tate, R. L. Emissions of N₂O from soils. *Nature* **1982**, *298*, 462. [[CrossRef](#)]
- ³⁸ Baggs, E. M.; Stevenson, M.; Pihlatie, A.; Regar, H.; Cook, H.; Cadish, G. N₂O emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant and Soil* **2003**, *254*, 361. [[CrossRef](#)]