



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ALZENEIDE DA SILVA LOPES

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-
AÇÚCAR FERTIRRIGADA POR GOTEJAMENTO
SUBSUPERFICIAL**

**JUAZEIRO – BA
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ALZENEIDE DA SILVA LOPES

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-
AÇÚCAR FERTIRRIGADA POR GOTEJAMENTO
SUBSUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da UNIVASF, Campus de Juazeiro, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Engenharia de Água e Solo.

Orientador: Luís Henrique Bassoi
Co-orientador: Aderson Soares de Andrade Júnior

**JUAZEIRO – BA
2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO

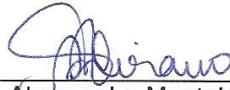
Alzeneide da Silva Lopes

**“EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-AÇÚCAR
FERTIRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL.”**

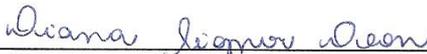
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Strito Sensu* em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.



Aderson Soares de Andrade Júnior, Prof. DSc.
Embrapa Meio Norte



Alessandra Monteiro Salviano, DSc.
Embrapa Semiárido



Diana Signor Deon, DSc.
Embrapa Semiárido



Davi José Silva, DSc.
Embrapa Semiárido

Juazeiro-BA, 10 de Fevereiro de 2017.

L864e Lopes, Alzeneide da Silva.
Emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial / Alzeneide da Silva Lopes. Juazeiro, 2017.
xi, 78 f. : il. ; 29 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Luís Henrique Bassoi.
Co-orientador: Prof. Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior

Referências.
1. Cana-de-açúcar. 2. Gases de efeito estufa. 3. Fertirrigação I. Título. II. Bassoi, Luís Henrique. III. Andrade Júnior, Aderson Soares de. IV. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

CDD 633.6187

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF
Bibliotecário: Renato Marques Alves

À Deus, por todas as oportunidades que tem me proporcionado, e por ser tudo em minha vida.

Aos meus pais Maria Oneide Silva e José de Arimatéia Lopes Sousa, pela dedicação, exemplo e amor incondicional e por permitirem a total liberdade nas minhas escolhas e na realização de meus objetivos.

As minhas avós Tereza da Silva e Maria Ester Lopes Lima (*in memoriam*).

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas oportunidades que tem me proporcionado, pela presença constante em minha vida.

À Universidade Federal do Vale do São Francisco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do mestrado.

Aos meus familiares, em especial meus pais José de Arimatéia Lopes Sousa e Maria Oneide Silva que sempre foram meu motivo de força maior, sem eles eu não teria chegado aonde cheguei. Aos meus irmãos Antônio Lopes, Alzeane Lopes, José Lopes Filho, Auriane Lopes e Aurister Lopes que sempre me deram apoio para seguir minha jornada. Aos meus pequenos Ingrid Vieira e Gabriel Vieira, por me fazer lembrar o quanto é bom ser criança e por me fazer esquecer das dificuldades “tia quer tudar com você”.

Ao meu Co-orientador Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior, por ser um exemplo de profissional, pelo incentivo, amizade, confiança, apoio, sugestões e conselhos em todos os momentos decisivos e importantes dessa etapa de minha formação.

Ao meu orientador Dr. Luís Henrique Bassoi, pelo apoio, paciência e compreensão, que mesmo distante me acompanhou e instruiu.

Ao Dr. Valdenir Queiroz Ribeiro pela calma e paciência com a qual me auxiliou na análise dos dados e montagem das tabelas, e pelas sugestões na redação da dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

À Embrapa Meio-Norte pelo apoio financeiro ao projeto, e pela infraestrutura concedida assim como a disponibilização do espaço físico e auxílio de pessoal para realização do experimento.

À Embrapa Cerrados pelas análises laboratoriais dos gases, em especial aos analistas, Diana Regazzi Zuim e Luciano de Almeida Pinheiro.

À doutoranda Mirya Grazielle Torres Portela, pela ajuda concedida na instalação das câmaras na área experimental e com os dados da pesquisa.

Aos pesquisadores Dr. Francisco de Brito Melo, Candido Athayde Sobrinho, Paulo Henrique Soares da Silva, e em especial ao Dr. Edson Alves Bastos pelas contribuições e ensinamentos.

Aos funcionários da Embrapa Meio Norte, em especial Joel Duarte Miranda pela amizade e contribuição na condução do experimento de campo, e aos técnicos do laboratório José Afonso Lima de Abreu, José Moreira e Diego Sávio.

Agradeço a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos Professores Dr. Clóvis Ramos, Luís Fernando Campeche, Mário de Miranda, Vivianne Marques, Paulo Gustavo Serafim, Marlon Garrido, Augusto Miguel Lima, Nelci Olszewski e Luciene Mendes, pelo ensino e aprendizagem.

À Carolina Torres, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – UNIVASF, pelo apoio e amizade.

Aos bolsistas e estagiários do setor de irrigação, da Embrapa Meio Norte, Fábio Nunes Nascimento, Marcos Vinicius Pereira, Renan Lima, Jardson Melão, Dônavan Holanda Nolêto, João Carlos Rocha dos Anjos, Valdeci Calixto da Silva Filho, Maciel Glezy, Diogo Sales, e em especial “as meninas da irrigação” Vitória de Freitas Paulo, Josiane Fonteneles e Jéssica Lima, pela amizade e contribuição na condução do experimento de campo.

Meu agradecimento especial a Roberta Mirelle Santos e Simone Renata Santos, com quem tive o prazer de dividir o lar, os momentos de alegria e tristeza. Obrigada pela imensa amizade que nunca terá fim.

À dona Maria Ivonete Santos e seu Antonio Mendes dos Santos, pelo carinho, amor e cuidado, dedicado a me durante minha estadia em Petrolina/Juazeiro que levarei para a vida.

Aos meus amigos de mestrado, Ebert Santos, Anderson Breno Souza, Camila Guimarães, Iug Lopes, Herica Fernanda de Sousa Carvalho, Dayanne Dias, Eivaldo Pereira de Cerqueira Júnior, pelos momentos felizes e de descontração.

À todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão dessa etapa de minha formação acadêmica.

Minha eterna e singela gratidão...

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos”.

(Fernando Pessoa)

CAPITULO I

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental.....	41
Figura 2. Esquema do espaçamento em fileira dupla, profundidade e ponto de instalação do tubo gotejador	42
Figura 3. Lâminas de irrigação e distribuição acumulada de N aplicado via fertirrigação por gotejamento subsuperficial ao longo do ciclo	44
Figura 4. Umidade e temperatura média diária do solo na área experimental	45
Figura 5. Precipitação acumulada e temperatura média mensal de agosto de 2014 a janeiro de 2015.....	46
Figura 6. Fluxos de C-CH ₄ em cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial	49
Figura 7. Fluxos de C-CO ₂ em cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial	50
Figura 8. Fluxos de N-N ₂ O em cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial ..	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química e físico-hídrica do solo da área, antes da implantação do experimento, Teresina, PI, 2014	41
Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson para os fluxos diários de CH ₄ , CO ₂ e N ₂ O em relação as doses de N (kg ha ⁻¹), temperatura e umidade do solo medida a 0,1m de profundidade	47
Tabela 3. Quadrados médios para emissão acumulada de N-N ₂ O, C-CO ₂ e C-CH ₄ referente as doses de N (kg ha ⁻¹) em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.	52
Tabela 4. Diferenças entre médias dos tratamentos referentes à emissão acumulada de C-CH ₄ (g m ⁻²) em função de doses de N (kg ha ⁻¹) quantificada antes e após a aplicação do fertilizante, dentro de cada coleta, em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.....	52
Tabela 5. Diferenças entre médias dos tratamentos referente a emissão acumulada de N-N ₂ O e C-CO ₂ (g m ⁻²) em função de doses de N (kg ha ⁻¹) quantificada antes e	

após a aplicação do fertilizante, dentro de cada coleta, em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.....54

CAPITULO II

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Lâminas de irrigação e precipitação pluviométrica acumulada na área experimental ao longo do período de avaliação.....66
- Figura 2.** Umidade e temperatura do solo ao longo do período experimental no cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial e adubação convencional.67
- Figura 3.** Fluxo de N-N₂O em cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial e adubação convencional69

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Características químicas do solo antes da implantação do experimento, em 201463
- Tabela 2.** Parcelamento da fertirrigação e suas respectivas doses proporcionais ..64
- Tabela 3.** Resumo análise de variância (Quadrados médios) referente à emissão acumulada de N-N₂O (g m⁻²) dos tratamentos fertirrigados, adubação convencional e testemunha sem fertilizante.....70
- Tabela 4.** Diferenças entre médias dos tratamentos referente a emissão acumulada de N-N₂O (g m⁻²) em função de doses de N e (kg ha⁻¹) no cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial e adubação convencional71
- Tabela 5.** Resumo análise de variância (Quadrados médios) referente ao fator de emissão (%) dos tratamentos fertirrigados e adubação convencional72
- Tabela 6.** Fator de emissão (FE) de N-N₂O associado as doses de N (kg ha⁻¹) no cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial e adubação convencional.73

LISTA DE EQUAÇÕES CAPITULO II

- Equação 1.** Cálculo do fluxo de N-N₂O em µg m⁻² h⁻¹65
- Equação 2.** Cálculo do fator de emissão de N-N₂O (%)66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Cana-de-açúcar	13
2.2 Irrigação e fertirrigação em cana-de-açúcar	14
2.3 Ciclo do nitrogênio	17
2.4 Efeito estufa	18
2.4.1 Dióxido de carbono em solos agrícolas	20
2.4.2 Metano em solos agrícolas	21
2.4.3 Óxido nitroso em solos agrícolas	23
2.5 Emissões de GEE em cultivo de cana-de-açúcar	27
3 REFERÊNCIAS	29
CAPITULO I – Emissões de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial	37
RESUMO	37
ABSTRACT	38
1 INTRODUÇÃO	39
2 MATERIAL E METÓDOS	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4 CONCLUSÃO	55
5 REFERÊNCIAS	55
CAPITULO II – Emissão de N ₂ O em cana-de-açúcar em resposta a aplicação de N por fertirrigação e via solo	59
RESUMO	59
ABSTRACT	60
1 INTRODUÇÃO	61
2 MATERIAL E METÓDOS	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4 CONCLUSÃO	74
5 REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

Um dos principais temas de debates da comunidade científica mundial diz respeito às mudanças climáticas. Essas alterações estão sendo provocadas pelo aumento da concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Os principais GEE são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), gases esses de maior importância dentre os causadores do efeito estufa.

Estudos recentes têm demonstrado que há um aumento na concentração desses gases na atmosfera (ALMEIDA et al., 2015). A agricultura tem um papel importante no aumento desses gases ao longo dos anos. Em âmbito global, estima-se que a agricultura contribui com cerca de 25% das emissões antrópicas desses GEE (IPCC, 2013). No Brasil, estima-se que 35% dos GEE emitidos para a atmosfera sejam originários das atividades agropecuárias (MCTI, 2013).

Dentre os GEE, o N_2O e o CH_4 são os que apresentam menor concentração na atmosfera. Entretanto, o poder de aquecimento do N_2O e do CH_4 na atmosfera são, respectivamente, 298 e 25 vezes maior quando comparado com o CO_2 , que tem maior concentração na atmosfera (IPCC, 2007). Esses gases são produzidos no desmatamento e queima de resíduos vegetais e nas atividades agrícolas de preparo do solo e aplicação de fertilizantes nitrogenados (URQUIAGA et al., 2010).

A emissão de N_2O normalmente é associada à fertilização nitrogenada, por aumentar a disponibilidade de Nitrogênio para os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação no solo. Ambos os processos são influenciados pela temperatura do solo, umidade e pH. As emissões de CO_2 no solo estão relacionadas, sobretudo, à respiração de organismos e ao sistema radicular das plantas e processos fisiológicos dos microrganismos envolvidos na decomposição de resíduos orgânicos. Por outro lado, a maior parte do CH_4 produzido no setor agrícola, está associada à produção animal e aos solos saturados com água por longos períodos, como, por exemplo, os solos cultivados com arroz irrigado por inundação.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e de seus derivados: açúcar e etanol. Na safra 2015 - 2016, o país produziu 655,15 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 8,95 milhões de hectares com produtividade de colmos de 73, 2 Mg ha^{-1} (CONAB, 2015).

Essa cultura tem sido indicada como uma das principais alternativas para a produção de biocombustíveis. Os biocombustíveis reduzem a emissão de gases

causadores do efeito estufa, atendendo à demanda da sociedade por energia limpa e por fontes energéticas baseadas na sustentabilidade ambiental, além de serem relativamente mais baratos e menos onerosos que os combustíveis de origem fóssil (OLIVEIRA et al., 2016).

Porém, a liberação de GEE durante o cultivo da cana-de-açúcar, que ocorre pelas queimadas e fertilização nitrogenada, tem gerado inúmeros questionamentos sobre os reais benefícios dos biocombustíveis no sentido de reduzir a emissão desses gases. A fertilização nitrogenada é o principal contribuinte para as emissões de GEE do sistema de produção de etanol produzido a partir da cultura de cana-de-açúcar (LISBOA et al., 2011).

No Brasil, não há resultados de pesquisa sobre a avaliação das emissões de GEE em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial. A irrigação constitui uma importante alternativa de melhoria da produtividade da cana-de-açúcar, sendo de extrema importância em região de notória escassez hídrica, como a região Nordeste. Além disso, também pode ser utilizada para a aplicação de fertilizante via fertirrigação, especialmente os nitrogenados. Em sistemas fertirrigados, os nutrientes são aplicados em baixa dosagem e alta frequência de aplicação, podendo reduzir as emissões de GEE provenientes desses fertilizantes, sobretudo o N_2O .

No Brasil a cana-de-açúcar é fertilizada com doses de nitrogênio que variam de 60 kg ha^{-1} a 120 kg ha^{-1} em cana-soca (CANTARELLA; ROSSETTO, 2010), geralmente aplicada em dose única, favorecendo a emissão de GEE pela disponibilidade de Nitrogênio no solo. Assim, é importante que sejam geradas informações sobre a emissão de GEE em cana-de-açúcar fertirrigada com diferentes doses de Nitrogênio. O conhecimento do padrão de emissão de GEE em escala local se faz necessário para identificar práticas de manejo que reduzam as emissões segundo as condições regionais de ambiente e manejo.

Com isso, uma prática que promova a redução na emissão de GEE durante o cultivo da cana-de-açúcar deverá contribuir para melhorar ainda mais o balanço energético dessa cultura. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi quantificar as emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada com diferentes doses de Nitrogênio aplicadas por gotejamento subsuperficial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar caracteriza-se por ser uma cultura de ciclo longo, com uma produção muito elevada de biomassa, cultivada em condições tropicais e subtropicais que podem afetar as emissões de GEE, principalmente N_2O , provenientes de fertilizante nitrogenado, utilizado ao longo do ciclo produtivo (SOARES et al., 2015).

A cana-de-açúcar, atualmente, desempenha papel de extrema importância para a economia do Brasil (SILVA et al., 2012). O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada em mais de 655 milhões de toneladas, colhidas em uma área plantada de aproximadamente 9 milhões de hectares, com produtividade de colmo de cerca de 73 Mg ha^{-1} (CONAB, 2015). Assim, o Brasil também se tornou líder mundial na produção de etanol da cana-de-açúcar (MAPA, 2016).

Nos últimos anos, a produção de cana-de-açúcar tem se expandido, estimulada, sobretudo, pelo incentivo ao consumo de combustíveis menos poluentes, como o etanol, que tornou o setor sucroalcooleiro nacional uma referência para os demais países produtores. A cana-de-açúcar é produzida em quase todo o território nacional, sendo que 60% da produção nacional concentra-se no estado de São Paulo. As demais zonas produtoras são Paraná, Triângulo Mineiro e Zona da Mata Nordestina (MAPA, 2016).

Essa cultura tem sido indicada como uma das principais alternativas para a produção de biocombustíveis, os chamados Combustíveis Renováveis. Os biocombustíveis diminuem a emissão de GEE, atendendo à demanda da sociedade por energia limpa e por fontes energéticas baseadas na sustentabilidade ambiental, além de serem economicamente mais viáveis que os combustíveis de origem fóssil (OLIVEIRA et al., 2016).

Diante disso, a cana-de-açúcar vem destacando-se como uma das melhores opções dentre as fontes de energia renováveis, justificando-se como importante cultivo no Brasil e no mundo. Contudo, a fertilização nitrogenada constitui-se num importante fator de produção dessa cultura.

A cana-de-açúcar tem a característica de ser uma cultura com elevado grau de tecnologia aplicada ao sistema produtivo, como, por exemplo, as elevadas doses de fertilizantes; controle biológico e químico de doenças e plantas daninhas; controle da compactação do solo com uso de pneus de alta flutuação; variedades melhoradas; uso de maturadores; dentre outros (DALRI; CRUZ, 2008).

Dentre os nutrientes essenciais, o nitrogênio, após o potássio, é o segundo nutriente mais absorvido pela cana-de-açúcar (MAURO FILHO et al., 2008; MELLO IVO et al., 2008). Assim, a fertilização nitrogenada tem se mostrado essencial para a cultura da cana-de-açúcar, especialmente na fase de socaria (TREVELIN, 2000; VITTI, 2003). A ureia tem sido a fonte nitrogenada mais utilizada na agricultura brasileira, representando cerca de 60% dos fertilizantes nitrogenados utilizados (CANTARELLA et al., 2008), em razão de seu menor custo em relação aos demais fertilizantes nitrogenados sintéticos.

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada com doses de nitrogênio que variam de 60 kg ha⁻¹ a 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio em soqueiras (CANTARELLA; ROSSETTO, 2010). Em outros países produtores de cana-de-açúcar, as doses desse fertilizante aplicadas na cultura são superiores a 120 kg ha⁻¹, com a obtenção de produtividades similares à brasileira (DONZELLI, 2007).

Embora o nitrogênio constitua apenas cerca de 1% da matéria seca total da cana-de-açúcar, ele está diretamente envolvido na síntese de aminoácidos, na composição da molécula de clorofila e na produção de carboidratos, portanto, desempenha função determinante no desenvolvimento dessa cultura (VITTI et al., 2010). Desta forma, o manejo adequado da fertilização nitrogenada poderá acarretar em aumento de produtividade e da longevidade da cultura, bem como contribuir para reduzir a emissão de GEE provenientes desses fertilizantes.

2.2 Irrigação e fertirrigação em cana-de-açúcar

A irrigação plena em cana-de-açúcar ainda é pouco difundida, porém seus benefícios para a cultura são vários e podem ser divididos em diretos e indiretos. Dentre os benefícios diretos evidenciam-se o aumento da produtividade agrícola e da longevidade das soqueiras e, dentre os indiretos, destacam-se a redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionados pela dispensa de arrendamentos de

terras e a redução com o transporte da cana, no caso da área arrendada ser mais distante da unidade industrial do que da área irrigada (DALRI; CRUZ, 2008).

Além disso, o uso de irrigação na cultura da cana-de-açúcar aumenta a quantidade de açúcar total recuperável e reduz o teor de açúcares redutores do caldo (QUINTANA et al., 2012). A esses benefícios da irrigação, podemos acrescentar ainda a possibilidade de aplicação de fertilizantes, sobretudo nitrogênio e potássio, via fertirrigação. Essa técnica adapta-se bem a diferentes sistemas de irrigação, sejam eles fixos, semifixos ou móveis. Entretanto, a aplicação desta técnica é mais recomendada para os sistemas de irrigação pressurizada, notadamente, o gotejamento subsuperficial (SOUSA et al., 2011).

Dentre os métodos de irrigação possíveis de utilização na cultura da cana-de-açúcar, tem-se destacado a irrigação localizada, principalmente, o gotejamento subsuperficial. Este promove o uso mais eficiente da água e caracteriza-se pela utilização localizada de água diretamente na zona radicular da cultura e pela elevada uniformidade de aplicação desta água (BARBOSA et al., 2012).

O gotejamento apresenta inúmeras vantagens comparativas em relação aos demais, dentre elas, podemos destacar: a melhor eficiência na aplicação dos fertilizantes que são dissolvidos na própria água de irrigação e aplicados via fertirrigação, possibilitando, com isso, melhor desenvolvimento da cultura (DALRI; CRUZ, 2002); maior produtividade (GAVA et al., 2008; ANDRADE JÚNIOR et al., 2012) e um produto de melhor qualidade (DALRI; CRUZ, 2008).

Adicionalmente a essas vantagens do gotejamento subsuperficial, acrescentam-se: a redução da evaporação da água direta da superfície do solo; o escoamento superficial; a redução de danos mecânicos ao sistema de irrigação; redução das perdas de nitrato (NO_3^-) abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular (MARQUES et al., 2006); uma menor interferência com os tratos culturais; uma maior disponibilidade de nutrientes, uma vez que o ponto de emissão de água se encontra mais próximo da raiz e a redução da germinação de sementes de plantas daninhas, pois a superfície do solo se mantém com baixo teor de água e, no caso da cana-de-açúcar, o aumento da longevidade do canavial (DALRI; CRUZ, 2008; ANDRADE JÚNIOR et al., 2012).

O uso do gotejamento subsuperficial na cultura da cana-de-açúcar nas lavouras brasileiras é recente, porém, esse sistema já é utilizado em maior escala em outros

países, principalmente na África do Sul e no estado americano do Havaí (QUINTANA et al., 2012). A expectativa é que o gotejamento subsuperficial ocupe áreas cada vez maiores nas lavouras brasileiras, especialmente na região Nordeste, já que promove a aplicação de água com maior eficiência, o que é muito importante em uma região com notória escassez hídrica.

A irrigação, além de constituir uma importante alternativa de melhoria na produção, também pode ser utilizada para a aplicação de fertilizante no solo (fertirrigação).

A fertirrigação consiste na aplicação de fertilizantes juntamente com a água de irrigação. Tal operação, além de fornecer o nutriente juntamente com a água (essencial para sua absorção), apresenta ainda muitas outras vantagens, entre as quais, podem ser citadas: uma melhor distribuição do fertilizante no campo e a possibilidade de fracionamento das doses recomendadas conforme a necessidade da cultura, aumentando a eficiência na utilização dos nutrientes pelas plantas (DUENHAS et al., 2002).

A fertirrigação permite manter a disponibilidade de água e nutrientes próxima aos valores considerados ótimos ao crescimento e à produtividade da cultura, justamente por permitir controlar as dosagens de forma precisa através dos injetores de fertilizantes. Sendo assim, a quantidade de nutrientes, parcelada ou não, deve ajustar-se às necessidades da cultura ao longo das fases de desenvolvimento (FERNANDES et al., 2002; CARDOSO; KLAR, 2011).

A fertirrigação possui a vantagem de melhorar a eficiência no uso dos nutrientes, devido ao parcelamento da adubação conforme a marcha de absorção de nutrientes pelas plantas, diferentemente do sistema convencional, que os fertilizantes são aplicados em alta quantidade, favorecendo o processo de lixiviação e perdas dos nutrientes (ROBERTS, 2008). Assim, parcelamento do fertilizante, principalmente os nitrogenados, poderá também reduzir as emissões de GEE, sobretudo, o N_2O , evitando, assim, as altas emissões do referido gás decorrente do uso de fertilizante(s).

Além disso, a fertirrigação proporciona maior movimentação do nutriente em profundidade e lateralidade, fato consideravelmente importante em culturas perenes e semi-perenes, como a cana-de-açúcar, haja vista a dificuldade de se incorporar fertilizantes, aplicados em cobertura, sem danificar o sistema radicular (QUINTANA, 2010).

2.3 Ciclo do Nitrogênio

O nitrogênio é um dos elementos essenciais requeridos em maior quantidade pelas plantas e o que mais limita o seu crescimento. O ciclo do nitrogênio no sistema solo-plantas é bastante complexo. Esse nutriente no solo está predominantemente na forma orgânica em mais de 95% do nitrogênio total. As frações inorgânicas são compostas principalmente por Amônio (NH_4^+) e Nitrato (NO_3^-), mas pequenas concentrações de Nitrito (NO_2^-) podem ocorrer em algumas situações (CANTARELLA, 2007).

O N_2 representa 78% dos gases da atmosfera. Porém, apesar dessa abundância, há escassez desse nutriente em formas disponíveis para as plantas, o que pode ser explicado pela extraordinária estabilidade do N_2 que, ao contrário de outras moléculas diatômicas, praticamente não é passível de reações químicas em condições naturais (SOUZA; FERNANDES, 2006).

O nitrogênio pode ingressar no sistema solo-plantas por deposições atmosféricas, fixação biológica, fertilização (química ou orgânica). Por sua vez, pode sair por meio de remoção pelas plantas e de variados mecanismos de perdas que incluem as perdas por lixiviação e volatilização (Figura 1). O ciclo do nitrogênio no solo é controlado por fatores físicos, químicos e biológicos e afetado por condições climáticas difíceis de prever e controlar (CANTARELLA, 2007).

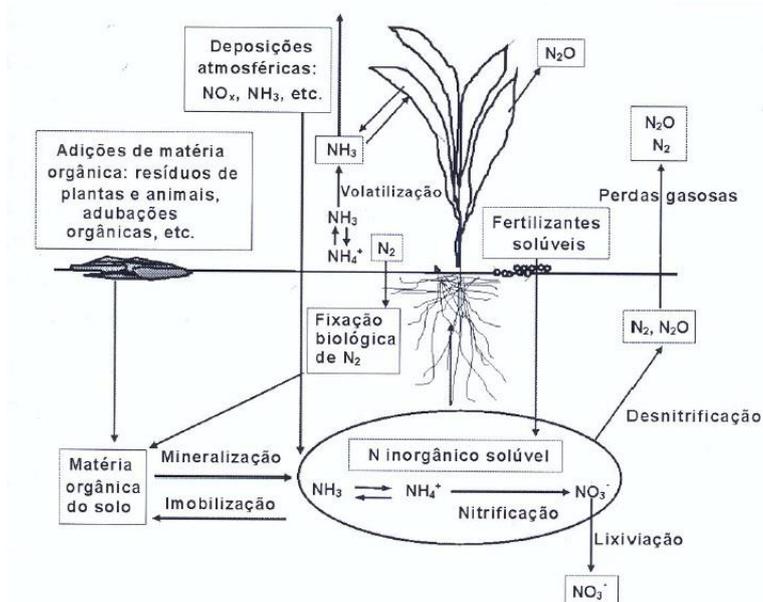


Figura 1. Ciclo resumido do nitrogênio no solo (CANTARELLA, 2007).

As plantas e a maioria dos microrganismos não são capazes de absorver o nitrogênio diretamente da atmosfera. O aproveitamento do N_2 só é possível através da fixação biológica, sendo esse um processo essencial para transformar o N_2 numa molécula estável e abundante na atmosfera, que não pode ser utilizada pelas plantas na forma inorgânica combinada com a amônia (NH_3) e, a partir daí, em formas reativas orgânicas e inorgânicas, vitais em sistemas biológicos (CANTARELLA, 2007).

Além da fixação biológica, pode ocorrer também a fixação atmosférica, que ocorre através dos raios e relâmpagos, cuja elevada energia separa as moléculas de N_2 e permite que os seus átomos se liguem a moléculas de oxigênio existentes no ar, formando monóxido de nitrogênio (NO). Este é posteriormente dissolvido na água da chuva e depositado no solo.

Após a fixação, bactérias do gênero de *Nitrosomonas*, *Nitrospira* e *Nitrosococcus* realizam a nitrificação – transformação de NH_3 em NO_2^- e a transformação de NO_2^- em NO_3^- por bactérias do gênero *Nitrobacter* (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). O NO_3^- formado pelo processo de nitrificação poderá ser absorvido pelas plantas, perdido por lixiviação ou ser utilizado nas reações desnitrificação.

Outra forma de disponibilização de nitrogênio orgânico do solo para as plantas é através do processo de mineralização, que consiste na transformação do nitrogênio na forma orgânica para a inorgânica NH_4^+ ou NH_3 . Esse processo é realizado por microrganismos heterotróficos (bactérias e alguns fungos) do solo, que utilizam os compostos orgânicos como fonte de energia. No solo também pode ocorrer o processo inverso, ou seja, a transformação do nitrogênio inorgânico em nitrogênio orgânico, processo chamado de imobilização, sendo os responsáveis por esse processo os microrganismos que incorporam o nitrogênio inorgânico disponível no solo às suas células (CANTARELLA, 2007).

Através dos processos de decomposição e de desnitrificação, o Nitrogênio retorna ao ambiente. As bactérias e alguns fungos presentes no solo decompõem a matéria orgânica, transformando-a em NH_3 . As bactérias desnitrificantes liberam o nitrogênio da NH_3 , dos NO_2^- e dos NO_3^- , devolvendo-o para a atmosfera.

2.4 Efeito estufa

O efeito estufa é um mecanismo natural que possibilita a manutenção da temperatura na Terra em níveis adequados para a existência dos seres vivos. Esse

fenômeno ocorre quando uma parte da radiação solar refletida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases, denominados “GEE”, presentes na atmosfera e que absorvem e emitem radiação infravermelha, gerando aumento na temperatura próxima à superfície da terra e um efeito estufa natural e importante para o surgimento e a manutenção da vida no planeta (MACHADO, 2005; ESCOBAR, 2008).

Essa interação permite que a temperatura média da atmosfera terrestre seja de 15°C. Caso não houvesse este fenômeno, a temperatura média da superfície terrestre seria 33°C menor, ou seja, -18°C, o que inviabilizaria a vida atualmente existente em nosso planeta (IPCC, 1995). Os GEE representam menos de 1% dos gases que compõem a atmosfera, sendo que, dentre os principais, temos o vapor d’água (H₂O), o CO₂, o CH₄ e o N₂O. Embora o vapor d’água seja, pela quantidade presente na atmosfera, o mais importante GEE, é pouco afetado pelas atividades antrópicas. Por outro lado, o CO₂, o CH₄ e o N₂O são muito influenciados por elas e considerados os mais importantes relacionados ao efeito estufa.

A concentração desses três gases na atmosfera tem aumentado significativamente desde o aparecimento das civilizações, especialmente em meados do século XIX, quando teve início a Revolução Industrial. A utilização dos recursos naturais, tais como o carvão e o petróleo e a conversão de ecossistemas nativos para agrossistemas (mudança de uso da terra), devido à atividade antrópica, tem causado impacto no balanço de radiação solar do planeta, tendendo ao aumento da temperatura do ar atmosférico (CERRI; CERRI, 2007; IPCC, 2007).

Em consequência disso, estima-se que, entre o período Pré-Industrial e 2011, houve um incremento na concentração atmosférica de CO₂, CH₄ e N₂O na ordem de 40%, 150% e 20%, respectivamente (IPCC, 2013). Os GEE diferem quanto ao seu Potencial de Aquecimento Global (PAG), que é determinado em função do tempo de permanência na atmosfera e da capacidade de absorver radiação infravermelha, considerando como padrão o PAG do CO₂ (valor=1), uma vez que este é o GEE mais abundante na atmosfera. Deste modo, considerando o tempo de vida de 12 (doze) anos para o CH₄ e de 114 (cento e quatorze) anos para N₂O, o PAG desses GEE equivale a 25 e 298 vezes ao do CO₂, respectivamente (IPCC, 2007).

Em âmbito global, estima-se que a agricultura contribui com cerca de 24% das emissões totais de CO₂, 85% das emissões de N₂O e 55% das emissões de CH₄ (IPCC, 2007). Entretanto, no Brasil, como reflexo da importância da agricultura como

atividade econômica, estima-se que ela (a agricultura) responde por mais de 35% do total das emissões de CO₂ eq. de origem antrópica, sendo que 78% do CH₄ e mais de 93% das emissões de N₂O têm como origem as atividades agropecuárias (MCTI, 2013).

2.4.1 Dióxido de carbono em solos agrícolas

O CO₂ é considerado o mais importante GEE antropogênico, devido à grande quantidade emitida. Nos últimos dois séculos e especialmente após a Revolução Industrial, a concentração desse gás na atmosfera vem aumentando drasticamente devido ao aumento das atividades industriais e dos transportes, associados à queima de combustíveis fósseis e de florestas e também a perdas por mineralização da matéria orgânica do solo (mudança de uso da terra) (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

No período que antecede a Revolução Industrial (1750), a quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera que era de 280 ppm (partes por milhão), passou para 391 ppm em 2011, correspondendo a um acréscimo de 40% e a perspectiva é a de que pode atingir entre 730 a 1.020 ppm até 2100 (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

No solo, a produção de CO₂ e transporte para a atmosfera está diretamente relacionado a processos biológicos, tais como a respiração de organismos e sistemas radiculares das plantas e os processos fisiológicos dos microrganismos envolvidos na decomposição de resíduos orgânicos (CARVALHO et al., 2010; MUÑOS et al., 2010), sendo a respiração radicular responsável por 20% da emissão total de CO₂ pelo solo e a atividade biológica, por 80% (MELILLO et al., 2002).

Vários são os fatores que controlam a produção e emissão de CO₂ no solo. Dentre eles podem ser mencionados: a umidade, a disponibilidade de nitrogênio e o pH. A falta de água no solo pode limitar a atividade microbiana e, normalmente, resulta em baixos fluxos de CO₂ quando o solo está seco (SCHAUFLENER et al., 2010). Por outro lado, o umedecimento do solo seco aumenta a atividade microbiana que estava latente no período seco e promove grandes pulsos de mineralização de carbono e nitrogênio, com conseqüente aumento na produção e emissão de CO₂ do solo (HARRISON-KIRK et al., 2013). Porém, quando o solo fica muito úmido, pode faltar O₂ para atividade microbiana ou dificultar a difusão de CO₂ do perfil do solo para a atmosfera e isso gera como resultado menores fluxos de CO₂ observados.

A temperatura do solo é um dos fatores que mais influencia no processo de emissão de CO₂ durante e entre os dias, pois seu incremento acelera a decomposição da matéria orgânica e a atividade microbiana e das raízes (SILVA-OLAYA et al., 2013). Estudos apontam que acréscimos na temperatura do solo podem elevar exponencialmente a taxa de respiração do solo (FANG; MONCRIEFF, 2001). Em razão das massas de ar, que circulam no planeta, possuem diferentes temperaturas, o fluxo de CO₂ é diferenciado; em regiões mais quentes, as emissões são superiores (CARVALHO et al., 2010).

As variáveis climáticas são determinantes no tocante à intensidade da emissão de CO₂ do solo, promovendo variações diárias nas taxas de emissão. Essas atuam diretamente sobre a temperatura e umidade do solo, que modificam os processos microbianos e de raízes, bem como a intensidade dos mesmos, podendo também alterar as emissões de CO₂ à atmosfera (COSTA et al., 2008).

Práticas de manejo que alteram o nível estacionário de longo prazo de carbono orgânico e nitrogênio no solo podem, potencialmente, aumentar ou diminuir a atividade biológica do solo, associadas à decomposição heterotrófica de matéria orgânica (MUÑOS et al., 2010), podendo, assim, aumentar ou reduzir as emissões de CO₂.

A estocagem de carbono nos solos é uma função do seu balanço, cujas entradas ocorrem na forma de resíduos vegetais ou fertilizantes orgânicos. Por outro lado, as liberações de carbono são decorrentes da mineralização de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo e ocorrem na forma de CO₂. Em condições anaeróbicas de solo, essas liberações de carbono ocorrem como CH₄ (LIMA, 2002).

2.4.2 Metano em solos agrícolas

O CH₄ é um importante GEE com grande longevidade na atmosfera. Nos últimos 250 anos, a concentração de CH₄ aumentou cerca de 150%, passando de 715 parte por bilhão (ppb), durante o período Pré-Industrial, para 1803 ppb em 2011, e vem aumentando a uma taxa de três ppb ano⁻¹ (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

As principais fontes antropogênicas de CH₄ procedem de atividades, como: cultivo de arroz; criação de animais; exploração e queima de petróleo e gás natural e

a disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, que resultam no aumento das emissões de CH_4 para atmosfera (TEIXEIRA et al., 2007).

Dentre os usos agrícolas, o cultivo de arroz irrigado por inundação é a principal fonte de emissão de CH_4 para atmosfera. A magnitude das emissões de CH_4 em solos inundados é influenciada pela disponibilidade de substratos orgânicos, sendo a taxa de produção desse gás aumentada com a adição de restos culturais, exsudatos radiculares e matéria orgânica (BAYER et al., 2011).

Nos solos agrícolas, a produção de CH_4 ocorre pelas bactérias metanotróficas que, em condições restritas de O_2 (oxigênio), reduzem os compostos orgânicos a CH_4 . No solo, a atividade das bactérias metanotróficas, que consomem e produzem o CH_4 , é regulada pela disponibilidade de O_2 (BREVILIERI; DIECKOW, 2015). Dentro dessa ótica, solos aerados apresentam capacidade de oxidar o CH_4 gerado e, ainda, dependendo da população de bactéria presente, podem vir a absorver o CH_4 da atmosfera (GOMES, 2006).

Vários fatores influenciam a taxa de oxidação de CH_4 pelas bactérias metanotróficas. A fertilização nitrogenada afeta prontamente a oxidação do CH_4 , através da competição do íon NH_4^+ com o CH_4 pela enzima monoxigenase, sendo que, após adubações nitrogenadas elevadas, ocorre no solo uma maior concentração de NH_4^+ disponível e, com isso, ao competir pela enzima, esse íon atua como inibidor da oxidação de CH_4 nos solos (BOECKX et al., 1997).

Assim, em uma situação de alta disponibilidade de nitrogênio, as bactérias metanotróficas podem ser estimuladas a oxidar o NH_4^+ em detrimento do CH_4 . As aplicações de fertilizantes nitrogenados e deposições atmosféricas de nitrogênio podem influenciar significativamente as taxas de oxidação de CH_4 em solos agrícolas. Como o uso de nitrogênio mundial aumenta, a importância dos efeitos desse elemento no consumo e ciclo global do CH_4 é susceptível de aumento (WANG; INESON, 2003). Em condições de parcelamento do nitrogênio total, esse efeito poderá ser reduzido ou até mesmo inibido.

Por outro lado, o uso de fertilizantes nitrogenados poderá aumentar a taxa de oxidação de CH_4 no solo por promover maior crescimento vegetativo, que gera aumento na evapotranspiração e reduz a porosidade total preenchida com água (BODELIER et al., 2004), uma vez que o aumento da evapotranspiração leva à redução da umidade do solo e aumenta a aeração e isso aumenta a oxidação de CH_4 .

Os autores argumentam que a maior oxidação de CH_4 seria resultado da maior difusão de CH_4 e O_2 para o solo, mas esse assunto merece ser bem mais estudado.

Além disso, poderá haver uma interferência na taxa de oxidação do CH_4 a longo prazo pelo poder de acidificação do solo decorrente da fertilização nitrogenada. Esta condição diminui a capacidade de estabelecimento das bactérias metanotróficas, diminuindo a capacidade do solo em absorver CH_4 atmosférico (HÜSTCH, 1998).

Carmo et al. (2013), em estudo conduzido em área típica de cultivo de cana-de-açúcar não irrigada de São Paulo, em que foram avaliadas emissões de CH_4 provenientes de solos adubados com vinhaça e fertilizantes sintéticos (a ureia foi a fonte de nitrogênio aplicada a uma taxa média de 60 kg ha^{-1}) verificaram-se que as emissões de CH_4 não foram detectadas, mas os resultados sugeriram que a oxidação de CH_4 foi o processo dominante no solo. É importante ressaltar que os solos agrícolas, com exceção do cultivo de arroz irrigado por inundação, são predominantemente aerados e, por isso, atuam como importante sumidouro de CH_4 (MARTINS, 2014).

2.4.3 Óxido nítrico em solos agrícolas

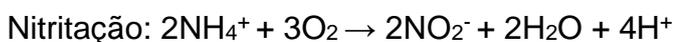
O N_2O é um potente GEE. Apesar de sua baixa concentração na atmosfera, 324 ppb (IPCC, 2013), ele se destaca pelo longo tempo de permanência (aproximadamente 114 anos) e elevado potencial de aquecimento global. Nos últimos 250 anos, a concentração de N_2O aumentou cerca de 20%, de 270 no período Pré-Industrial para 324 ppb em 2011 ou a uma taxa de $0,8 \text{ ppb ano}^{-1}$ (WANG et al., 2012; IPCC, 2007; IPCC, 2013).

Dentre as fontes antrópicas de N_2O estão: a aplicação de fertilizantes nitrogenados; a deposição de dejetos animais em solos agrícolas; a aplicação de fertilizantes orgânicos ricos em nitrogênio; a queima de biomassa e a queima de combustíveis fósseis e, além disso, alguns mecanismos naturais que ocorrem nos ecossistemas terrestres e aquáticos (CERRI et al., 2009; SIGNOR; CERRI, 2013).

A maior parte do N_2O emitido pelos solos é produzida pelos processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, entanto, uma pequena parcela da produção de N_2O vem de processos estritamente químicos, como: a decomposição química da Hidroxilamina (NH_2OH) e do NO_2^- (BREMNER, 1997). Nitrificação e desnitrificação,

por serem os processos biológicos que ocorrem nos solos que mais contribuem para as emissões de N₂O, serão assuntos a serem discutidos a seguir.

O processo de nitrificação representa a oxidação aeróbica de NH₄⁺ a NO₂⁻ ou NO₃⁻. Esse processo é realizado por bactérias quimioautotróficas e ocorre em duas etapas: Nitrificação, em que o NH₄⁺ é oxidado a NO₂⁻ por ação de bactérias do gênero de *Nitrosomonas*, *Nitrospira* e *Nitrosococcus*; e Nitratação, em que o NO₂⁻ é oxidado a NO₃⁻ por *Nitrobacter sp.*, *Nitrospira sp.* e *Nitrococcus sp.* (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). De maneira geral, o processo de nitrificação pode ser resumido pelas reações a seguir:



O processo de nitrificação, por ser aeróbio, é favorecido em solos bem drenados, com disponibilidade de NH₄⁺, NO₂⁻ e O₂, adequados à atividade microbiana (BREVILIERI; DIECKOW, 2015).

A desnitrificação é o processo de redução anaeróbica de NO₃⁻ até N₂, mediado por um grande número de espécies de bactérias anaeróbicas facultativas, as quais, na ausência de O₂, utilizam o NO₃⁻ como receptor de elétrons (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; CANTARELLA, 2007). O processo acontece em quatro etapas com reduções sucessivas do nitrogênio. Os principais gases resultantes desse processo são o N₂O e o N₂, cujas proporções são variáveis de acordo com as condições do meio (CANTARELLA, 2007).



O processo de desnitrificação é favorecido pela disponibilidade de carbono e pela presença de NO₃⁻, proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo e da aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos (ALMEIDA et al., 2016). Logo, a presença de matéria orgânica também é importante para sua ocorrência (JANTALIA et al., 2006).

Tanto as reações de nitrificação quanto as de desnitrificação são afetadas por características do solo, tais como: aeração, umidade, temperatura, disponibilidade de

Nitrato ou Amônio, textura, pH, matéria orgânica, relação carbono/nitrogênio, fertilizante e presença de fatores tóxicos aos microrganismos (SMITH et al., 2003; CARMO et al. 2005; JANTALIA et al., 2006).

A temperatura e umidade do solo afetam diretamente os processos de nitrificação e desnitrificação (GIACOMINI et al., 2006). Em temperaturas amenas, a taxa de conversão de compostos nitrogenados é baixa, aumentando à medida que a temperatura também aumenta. Por sua vez, o aumento da umidade no solo provoca o acréscimo na quantidade de espaço poroso ocupado por água (EPSA) e tem efeito direto sobre a disponibilidade de O_2 (BRAGA et al., 2011). A taxa máxima de nitrificação geralmente ocorre quando o solo apresenta EPSA entre 35% e 60%, quando há água suficiente para promover o desenvolvimento dos nitrificadores e, ao mesmo tempo, espaço poroso suficiente para difusão do O_2 . EPSA superior a 70% favorece as reações de desnitrificação, favorecendo uma maior emissão deste gás. No entanto, a anaerobiose favorece perdas na forma de N_2 (CANTARELLA, 2007; JANTALIA et al., 2006).

Com relação à textura, esta afeta, sobretudo, a capacidade de retenção de água, conseqüentemente, a disponibilidade de O_2 e carbono para a atividade microbiana responsável pelos processos de nitrificação e desnitrificação. Os solos argilosos mantêm a umidade do solo alta por mais tempo, limitando a disponibilidade de O_2 e favorecendo as perdas de N_2O por nitrificação e desnitrificação (TAN et al., 2009).

O pH do solo, que influencia a mineralização de nitrogênio, interfere na quantidade de N_2O que será produzido, uma vez que pode alterar as enzimas que participam das reações de formação do N_2O no solo. A enzima que reduz N_2O a N_2 é inibida em baixo pH e na presença de O_2 . Portanto, em baixo pH, a proporção de N_2O emitida será maior, já que uma pequena quantidade será reduzida a N_2 (CHARPUISS-LARDY et al., 2007).

A relação carbono/nitrogênio também interfere na quantidade de N_2O que será produzida. Solos com baixa relação carbono/nitrogênio apresentam predomínio do processo de mineralização do nitrogênio em relação ao processo de imobilização, aumentando a quantidade disponível desse nutriente, que poderá ser absorvido pelas plantas ou ficar disponível para os processos microbiano de nitrificação e desnitrificação (SIGNOR, 2010).

Firestone e Davidson (1989) propuseram um modelo conceitual que sintetiza a influência dos fatores microbiológicos e ecológicos atuando sobre as emissões de NO e N₂O nos solos, conhecido como “*hole-in-the-pipe*”. Este modelo sugere que as produções de NO e N₂O devem ser dadas em função da disponibilidade de nitrogênio no solo. Num primeiro momento, a quantidade de nitrogênio fluindo, que passa pelo tubo (“pipe”), é análoga à taxa de ciclagem de nitrogênio em geral, ou especificamente, às taxas de oxidação de NH₄⁺ por bactérias nitrificantes e redução de NO₃⁻ por bactérias desnitrificantes. As quantidades de NO e N₂O perdidas pelos buracos do tubo (“*hole*”) representam o segundo nível de controle das taxas de emissão e são determinadas primariamente pelo conteúdo de água no solo.

A fertilização nitrogenada influencia diretamente na quantidade de nitrogênio disponível na forma de NO₃⁻ e NH₄⁺ no solo, resultando em aumento das emissões de N₂O por nitrificação ou desnitrificação, uma vez que esses processos são dependentes do conteúdo de nitrogênio no solo. Diversos estudos avaliando o efeito de diferentes doses de nitrogênio sobre as emissões de N₂O em cana-de-açúcar não irrigada têm demonstrado aumento dos fluxos de N₂O no solo em resposta ao aumento da disponibilidade do nitrogênio (BARBOSA, 2014; CARMO et al., 2013; MORO, 2012; PAREDES et al., 2014; SIGNOR et al., 2013).

As emissões de N₂O induzidas por fertilizantes nitrogenados são dependentes da taxa de aplicação de nitrogênio e as respostas são diferentes de acordo com a fonte desse nutriente (SIGNOR et al., 2013). Nesse sentido, a aplicação parcelada poderá aumentar a eficiência no uso de nitrogênio e reduzir as perdas por lixiviação e desnitrificação, apresentando benefícios na mitigação de GEE e proporcionando uma produção sem desperdício de recursos, mais econômica (TAN et al., 2009). Logicamente, esse efeito benéfico do parcelamento da fertilização nitrogenada no sentido de aumentar a eficiência de uso do nitrogênio e, conseqüentemente, reduzir as emissões de GEE, pode ser ainda mais pronunciado em áreas de cana-de-açúcar fertirrigada.

A metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para estimar o Fator de Emissão (FE) que representa a percentagem de nitrogênio fertilizante quando aplicado no solo, convertido a N₂O e emitido para a atmosfera, propõe que 1% da quantidade de nitrogênio aplicado é perdido na forma de N₂O, embora a faixa de incerteza esteja entre 0,3% e 3% (IPCC,

2006). Porém, a percentagem real pode variar em função de práticas de manejo e fatores ambientais e do solo (EICHNER,1990; CARMO et al, 2013; VARGAS et al., 2014).

Esse fator de 1% foi proposto pelo IPCC inicialmente para facilitar as estimativas de emissão de N_2O em inventários de GEE e estudos de pegada de Carbono e/ou análises de ciclo de vida em agroecossistemas. Esse fator foi baseado na emissão média de N_2O de mais de 800 trabalhos desenvolvidos em condições de campo.

Uma grande variação de fator de emissão é encontrada na literatura, que depende de cada situação. Carmo et al. (2013) relataram fator de emissão de 0,7% do nitrogênio aplicado como ureia em canaviais no Brasil, porém, o fator de emissão do fertilizante aumentou para 3% quando a vinhaça e palhada estavam presentes. Na região de Piracicaba, Signor et al. (2013) relataram perdas mais elevadas de N_2O (2,84 a 6,67%) em área de cultivo de cana-de-açúcar quando comparadas às perdas relatadas por Carmo et al. (2013).

A presença de palhada na superfície do solo contribui para manter a umidade deste, possibilitando condições anaeróbicas e favorecendo a ocorrência de elevadas emissões de N_2O por mais tempo, sendo que, a ocorrência de precipitação pode ter aumentado as emissões induzidas pelo fertilizante. Essas condições, provavelmente, favoreceram perdas mais elevadas de N_2O (2,84 a 6,67%) na região de Piracicaba (SIGNOR et al., 2013). Porém, no Brasil, são escassas as pesquisas sobre emissões de N_2O em cultivos irrigados e/ou fertirrigados, denotando, portanto, que existe uma ampla área para ser estudada no país.

2.5 Emissões de GEE em cultivo de cana-de-açúcar

Altas emissões de N_2O (3-25 $kg\ ha^{-1}N$) foram registradas a partir de solos cultivados com cana-de-açúcar na Austrália (WANG et al., 2008; DENMEAD et al., 2010). Dentre os fatores que contribuem para as altas emissões de N_2O nesses solos cultivados com cana-de-açúcar na Austrália, citam-se: o clima quente e úmido; a palhada deixada na superfície do solo após a colheita; o tipo de solo e a grande quantidade de fertilizante nitrogenado aplicado durante o cultivo da cana-de-açúcar ($>120\ kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) (WANG et al., 2012).

No Brasil, estudos realizados por Barbosa (2014) em cana-de-açúcar não irrigada e irrigada com esgoto doméstico tratado e água de reservatório superficial, com e sem complementação nutricional, demonstrou que o uso da fertirrigação, minimiza a emissão de N_2O em comparação ao cultivo não irrigado com adubação de cobertura.

Nesse estudo, a emissão de N_2O no cultivo não irrigado com adubação de cobertura foi superior à verificada nos tratamentos fertirrigados, com valor médio de $4,95 \text{ kg ha}^{-1}$ de $N-N_2O$, determinando que a prática da fertilização nitrogenada com a mesma quantidade de fertilizantes minerais ou orgânica, via fertirrigação em cana-de-açúcar, reduziu a emissão de N_2O .

Carmo et al. (2013) determinaram em estudo com cana-planta não irrigada e adubada de forma convencional, que as emissões de N_2O e CO_2 aumentaram significativamente quando fertilizantes orgânicos (vinhaça e torta de filtro) foram aplicados em combinação com fertilizante mineral, a maioria dos aumentos ocorrem logo após a aplicação de fertilizantes, com pico cerca de 30 dias após aplicação do fertilizante.

Avaliando a emissão de CH_4 e N_2O com diferentes doses de nitrogênio durante o cultivo da cana-planta e soca, Moro (2012) constatou que a emissão de N_2O aumentou linearmente com as doses de nitrogênio aplicada na cultura. Na média dos ciclos de cana planta e soca para cada 20 kg ha^{-1} de nitrogênio aplicado, são emitidos $0,28 \text{ kg ha}^{-1}$ de $N-N_2O$. Já a emissão de CH_4 não foi influenciada pela fertilização nitrogenada durante o cultivo da cana-planta e soca; o solo oxidou mais Metano do que emitiu funcionando com dreno de CH_4 .

Signor (2010), em área de cultivo de cana-de-açúcar avaliando o efeito de nitrato de amônio e ureia sobre a emissão de CO_2 , constatou que nos tratamentos fertilizados com nitrato de amônio as emissões de CO_2 não foram influenciadas durante o período de avaliação; entretanto, para os tratamentos com ureia, as emissões de CO_2 aumentaram linearmente com o aumento da dose.

Nos trabalhos encontrados na literatura com avaliação de GEE em cana-de-açúcar (SIGNOR, 2010; SIGNOR et al., 2013; CARMO et al., 2013; MORO, 2012), o nitrogênio foi aplicado em dose única. Por outro lado, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada, as doses de nitrogênio são parceladas e aplicadas ao longo do ciclo da cultura (BARBOSA, 2014). Podendo ser, portanto, uma importante prática de

manejo da fertilização nitrogenada por aumentar a eficiência de uso do nitrogênio e, conseqüentemente, reduzir as emissões de GEE em áreas de cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.

3 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. F.; NAVES, E. R.; SILVEIRA, C. H.; WENDLING, B. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: uma revisão. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.8, n.2, p. 441-461, 2015.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n.1, p. 78-84, 2012.
- BARBOSA, E. A. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.952–958, 2012.
- BARBOSA, E. A. A. **Sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial**. 2014.135p. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C.E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; NICOLOSO, R. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**, v. 7, p. 55-118, 2011.
- BODELIER, P. L. E.; LAANBROEK, H. J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 47, p. 265-277, 2004.
- BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.49, n.1-3, p. 91-95, 1997.
- BRAGA, D.M.; COSTA, M.K.L.; PONTES, T.L.; ALVES, B.J.R.; SHIGAKI, F. Volatilização de amônia e emissão de óxido nitroso em função da adubação com ureia e vinhoto em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33. 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: **anais**. Uberlândia: SBCS: UFU, ICIAG, 2011.
- BREVILIERI, R. C.; DIECKOW, J. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em solos agrícolas e florestais como indicador de serviços ambientais. In: PARRON,

L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Org.). **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**, Brasília: Embrapa, 2015. p.109-121. Sistema requerido: Adobe. Modo de acesso: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/item/14>> acesso em 25 de agosto de 2016.

BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, p. 7-16, 1997.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Revisão de literatura: Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 277-289, 2010.

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.; BERNOUX, M. Soil, a sinkfor? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTURITTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 4, p. 397- 401, 2008.

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Fertilizantes para cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010.

CARDOSO, G. G de G.; KLAR, A. E. Fracionamento da fertirrigação e seu efeito na produção da alface sob ambiente protegido. **Irriga**, v. 16, n. 3, p. 259-270, 2011.

CARMO, J.B.; ANDRADE, C.A.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C. Disponibilidade de nitrogênio e fluxos de N₂O a partir de solo sob pastagem após aplicação de herbicida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 735-746, 2005.

CARMO, J. B.; FILOSO, S. ZOTELLI, L. C.; 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. E. NETO, NETO, A. E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emission from sugarcane soil in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and cropstrash accumulation. **GCB Bioenergy**, v.5, n.3, p.267-280, 2013.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 40-44, 2007.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 2, n. 2, Brasília, 2015. Disponível em <http://www.conab.gov.br>>acesso em 20/02/2016.

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases do efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 545-559.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n.1, p. 29-34, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v. 28, n.3, p. 516-524, 2008.

DENMEAD, O.T.; MACDONALD, B. C. T.; BRYANT, G.; NAYLOR, T.; WILSON, S.; GRIFFITH, D. W. T.; WANG, W. J.; SALTER, B., WHITE, I.; MOODY, P. W. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, p. 748–756, 2010.

DONZELLI, J. L. Uso de fertilizantes na cana-de-açúcar no Brasil. In: MACEDO, I. C. (Org.). **A energia da cana-de-açúcar**. 2ª ed. São Paulo: Única, 2007. 246p.

DUENHAS, L. H.; VILLAS BÔAS, R. L.; SOUSA, C. M. P.; RAGOZO, C. R. A.; BULL, L. T. Fertirrigação com diferentes doses de NPK e seus efeitos sobre a produção e qualidade de frutos de laranja (*Citrus sinensis O.*) 'Valência'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 1, p. 214-218, 2002.

EICHNER, M.J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data. **Journal of Environmental Quality**, v. 19, p. 272-280, 1990.

ESCOBAR, L. F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do Planalto Médio do Rio Grande do Sul**. 2008. 104p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biol. Biochem**, v. 33, p. 155-165, 2001.

FERNANDES, C.; ARAÚJO, J.A.C.; CORÁ, J.E. Impacto de quatro substratos e parcelamento da fertirrigação na produção de tomate sob cultivo protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 559-563, 2002.

FIRESTONE, M. K.; DAVIDSON, E. A. Microbial basis of NO and N₂O production and consumption in soil: ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (Ed.). **Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere**. New York: John Wiley, 1989, p.7-21.

GAVA, G.J.G.; SILVA, M.A.; CRUZ, J.C.S.; JERÔNIMO, E.M.; OLIVEIRA, M.W.; KRONTAL, Y. VERED, E.; AGUIAR, F.L.; PEDROSO, D.B. Produtividade e atributos

tecnológicos de três cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9, 2008. Anais. Maceió: STAB, p. 751-755, 2008.

GIACOMINI, S. J.; JANTALIA, C. P.; AITA, S.; 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**, v. 41, p. 1653-1661, 2006.

GOMES, J. **Emissão de gases de efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 2006. 129 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HARRISON-KIRK, T.; BEARE, M. H.; MEENKEN, E. D.; CONDRON, L. M. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p. 43-55, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC, 2007. Climate change 2007: The physical science basis. **Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: p. 1-18. In S. SOLOMON, S. et al. (ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

_____. IPCC, 2006. **Guidelines for national greenhouse gas inventory: Agriculture, forestry and other land use**, v.4. 2006.

_____. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G-K.; ALLEN, M. S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; SANTOS, H P.; TORRES, E.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Em Busca da Mitigação da Produção de Óxido Nitroso em Sistemas Agrícolas: Avaliação de Práticas Usadas na Produção de Grãos no sul do País. In: ALVES, B.J. R.; URQUIAGA, S.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Porto Alegre: Gênese, v. 1, p. 81-108, 2006.

LIMA, M. A. de. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Caderno de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 451-472. 2002.

LISBOA, C.C; BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases-known and unknowns. **Global Change Biology Bioenergy**, v.3, n. p. 277-292, 2011.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cana-de-açúcar**. 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>> Acesso em: 09 ago. 2016.

MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. P. M.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; VALE, D. W. (Ed.). **Tópicos em Tecnologia Sucoalcooleira**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 2006. 191p.

MARTINS, A. A. **Fluxos de N₂O, CH₄ e CO₂ em citros adubado via fertirrigação**. 2014. 103p. Dissertação (mestrado)-Instituto agrônomo de Campinas, Campinas.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013, 76 p.

MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; ABER, J.D.; NEWKIRK, K.; LUX, H.; BOWLES, F.P.; CATRICALA, C.; MAGILL, A.; AHRENS, T.; MORRISSEAU, S. Soil warming and carbon cycle feedbacks to the climate system. **Science**, Washington, v. 298, p. 21732176, 2002.

MELLO IVO, W. M. P.; ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D.; BARBOSA, G. V.S.; VASCONCELOS, J. N. Impulsionando a Produção e a Produtividade da Cana-de-açúcar no Brasil. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. (Ed.). **Desenvolvimento da Agricultura Tropical**. Brasília: Embrapa, 2008, v 1. p. 673 - 716.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 729 p.

MORO, V. J. **Emissão de gases de efeito estufa na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo e doses de nitrogênio**. 2012. 64 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOURA FILHO, G.; SILVA, L. C.; ALMEIDA, A. C. S.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; SILVA, V. T.; MOURA, A. B. Extração e exportação de nutrientes pelas cultivares RB92579 e RB93509 no ciclo de cana planta. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...STAB**, 2008. p. 307-311.

MUÑOZ, C.; PAULINO, L.; MONREAL, C.; ZAGAL, E. Greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions from soils: a review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 70, n. 3, p. 485-497, 2010.

OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S.; WALKER, A. M. ANÁLISE biométrica de cultivares de cana-de-açúcar cultivadas sob estresse hídrico no vale do Submédio São Francisco. **Energia na Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 48-58, 2016.

PAREDES, D. S.; LESSA, A. C. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. **Nutr Cycl Agroecosyst**, v. 98, p. 41-55, 2014.

QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. 2010. 69f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

QUINTANA, K. A.; ZANINI, J. R.; SILVA, E. R. Irrigação e fertirrigação por gotejamento em cana-de-açúcar na presença e ausência de boro. **Científica**, Jaboticabal, v.40, n.2, p.103-116, 2012.

ROBERTS, T. L. Improving nutrients use efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v.32, p.177-182, 2008.

SILVA, T. G.; MOURA, M. S.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. D. S.; JÚNIOR, W. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro¹. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 64-71, 2012.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322-338, 2013.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; LA SCALA JR, N.; DIAS, C. T. S. CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; CARMO, J. B.; MARTINS, A. A.; SOUSA, R. M.; ANDRADE, C. A. Enhanced-Efficiency Fertilizers in Nitrous Oxide Emissions from Urea Applied to Sugarcane. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 2, p. 423-430, 2015.

SOUZA, V. F.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; NOGUEIRA, L. C.; COELHO, M. A.; ARAÚJO, A. R. Manejo da fertirrigação em fruteiras e hortaliças. In:_____. **Manejo da fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, Embrapa, 2011.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S. (ed.) **Nutrição mineral de plantas**: Viçosa, SBCS, 2006.

SCHAUFLEER, G.; KITZLER, B.; SCHINDLBACHER, A.; SKIBA, U.; SUTTON, M.A.;

ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 683–696, 2010.

SMITH, K.A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K.E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, 54, p. 779-791, 2003.

TAN, L. Y. S.; ES, H. M.; DUXBURY, J. M.; MELKONIAN, J. J.; SCHINDELBECK, R. R.; GEOHRING, L. D.; HIVELY, W. D.; MOEBIUS, B. N. Single-event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type, tillage, rotation, and fertilization. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n.1, p. 19-26, 2009.

TEIXEIRA, P. F.; LIOTTI, R. G.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; CABRAL, A.; VAZOLLER, R. F.; TEIXEIRA, C. E.; MARINHO, F.A.M. Processo de Oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS - Salvador-2007. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov>.

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: Três casos estudados com o uso do traçador ¹⁵N**. 2000. 143p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. **Informações Agrônomicas** nº 130, p. 12-21, 2010.

VARGAS, V.P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A. A.; SOARES, J.R.; CARMO, J. B.; ANDRADE, C.A. Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech**, v. 16, p.174–179, 2014.

VITTI, A. C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: Manejo e efeito na produtividade**. 2003. 114p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; ROSSETTO, R. Nitrogênio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: 1ª Ed. Instituto Agrônomico, 2010, p. 239-270.

WANG, Z.; INESON, P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 3, p. 427-433, 2003.

Wang, W. J.; Moody, P. W.; Reeves, S. H.; Salter, B.; Dalal, R. C. Nitrous oxide emissions from sugarcane soils: effects of urea forms and application rate. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.30, p. 87-94, 2008

WANG, W.J.; SALTER, B.; REEVES, S.H.; BRIEFFIES, T.C.; PERNA, J. Nitrous oxide emissions from a sugarcane soil under different fallow and nitrogen fertiliser management regimes. **Proc AustSoc Sugar CaneTechnol**, v. 34, 2012.

CAPITULO I

Emissões de CO₂, CH₄ e N₂O em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial

RESUMO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados: açúcar e etanol. No entanto, poucos estudos têm sido realizados para avaliar o efeito da fertilização nitrogenada, via sistema de irrigação, na cultura da cana-de-açúcar sobre as emissões de gases de efeito estufa. Assim, um experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, Piauí, para quantificar as emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial. O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições e parcelas subdivididas. As parcelas foram constituídas pela combinação de quatro doses de N e K₂O (0 - 0; 60 -120; 120 – 180 e 180 - 120 kg ha⁻¹ de N e K₂O, respectivamente) e as subparcelas, por duas épocas de coleta de gases de efeito estufa (C1- antes e C2 - depois da fertirrigação). Foram quantificadas as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O. As coletas tiveram início em agosto de 2014 e se estenderam até janeiro de 2015. Os fluxos foram medidos utilizando-se o método da Câmara Estática Fechada. As câmaras foram instaladas no centro da parcela experimental, entre as fileiras duplas de plantio, sobre a linha de gotejamento subsuperficial. A fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar, aplicada via fertirrigação por gotejamento subsuperficial, não influenciou as emissões acumuladas de CH₄ e CO₂ durante o período de avaliação. Os fluxos diários de N₂O e CH₄ correlacionaram-se com as doses de nitrogênio, temperatura e umidade do solo, mas não houve correlação entre os fluxos de CO₂ e esses mesmos fatores. O aumento da dose de nitrogênio de 60kg ha⁻¹ para 120 kg ha⁻¹ não afetou a emissão de N₂O, enquanto que o aumento da dose de 120 kg ha⁻¹ para 180 kg ha⁻¹ proporcionou um aumento de 58% na emissão total de N₂O.

Palavras chave: *Saccharum officinarum*. Nitrogênio. GEE. Fertirrigação

Emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in sugar cane fertirrigated by subsurface drip

ABSTRACT

Currently, Brazil is the world's largest producer of sugarcane and its derivatives, sugar and ethanol. However, few studies have been carried out to evaluate the effect of nitrogen fertilization through irrigation system in the sugar cane crop, on greenhouse gas emissions. Thus, an experiment was carried out at Embrapa Mid-North, Teresina, State of Piauí, Brazil, to quantify greenhouse gas emissions in fertirrigated sugar cane by subsurface drip irrigation. The soil in the area was classified as dystrophic Yellow Red Argissolo. The experimental design was in randomized blocks, with four replications and split plots. The plots consisted of the combination of four doses of N and K₂O (0-0, 60-120, 120-180 and 180-120 kg ha⁻¹ of N and K₂O, respectively) and the subplots for two seasons of gas collection (C1- before and C2 - after fertirrigation). CO₂, CH₄ and N₂O emissions were quantified. The collections started in August 2014 and were extended until January 2015. Flows were measured using the closed chamber static method. The chambers were installed in the center of the experimental plot, between the double rows of planting, on the subsurface drip line. Nitrogen fertilization in sugarcane applied through subsurface drip irrigation did not influence the accumulated emissions of CH₄ and CO₂ during the evaluation period. The daily flows of N₂O and CH₄ correlated with the N rates, soil temperature and soil moisture, but there was no correlation between CO₂ flows and these same factors. Increasing the dose of N from 60 to 120 kg ha⁻¹ did not affect the emission of N₂O, while increasing the dose from 120 to 180 kg ha⁻¹ provided a 58% increase in the total emission of N₂O.

Key words: *Saccharum officinarum*. Nitrogen. GEE.

1 INTRODUÇÃO

Os principais gases de efeito estufa - GEE - são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). A concentração desses gases vem aumentando na atmosfera, devido às atividades antrópicas com aumento de 40% (para 391 ppm), 150% (para 1.803 ppb) e 20% (para 324 ppb), respectivamente, acarretando em alterações climáticas (IPCC, 2013), notadamente, na elevação da temperatura média do ar. O CH_4 e o N_2O são os GEE mais importantes em sistema de cultivo de cana-de-açúcar (PAREDES et al., 2014).

O aumento nas emissões de CO_2 se deve, em grande parte, à queima de combustíveis fósseis e às mudanças de uso da terra. O CH_4 provém de atividades agropecuárias (cultivo de arroz irrigado e criação de animais) e da queima de combustíveis fósseis; já as emissões de N_2O , devem-se, principalmente, à agricultura, sendo o uso de fertilizante nitrogenado considerado uma das principais razões para o aumento de N_2O na atmosfera (IPCC, 2007).

No Brasil, a agricultura como atividade econômica responde por mais de 35% do total das emissões de CO_2 eq. de origem antrópica, sendo que, 78% do CH_4 e mais de 93% do N_2O , têm como origem as atividades agropecuárias (MCTI, 2013). Por estas razões, o setor agrícola tem sido considerado com prioridade no contexto da mitigação das emissões de N_2O , CH_4 e CO_2 no Brasil (CERRI et al., 2009).

Os dados citados acima demonstram a necessidade de desenvolvimento de práticas de manejo que visem à mitigação das emissões de N_2O , CH_4 e CO_2 pela agricultura, sobretudo para cultivo de cana-de-açúcar, em função do grande interesse nessa cultura para a produção de biocombustível, cujo principal é o etanol. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A cultura representa grande importância econômica no país, chegando a 8,95 milhões de hectares cultivados, com uma produtividade média de $73,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ na safra 2014/2015 (CONAB, 2015).

A prática da irrigação constitui uma importante alternativa de melhoria da produtividade de cana-de-açúcar, sendo de extrema importância em região de notória escassez hídrica, como a região Nordeste. Essa prática também pode ser utilizada para a aplicação de fertilizante no solo, via fertirrigação, especialmente os nitrogenados. Em sistemas fertirrigados, os nutrientes são aplicados em baixa

dosagem e alta frequência de aplicação, podendo reduzir as emissões de GEE provenientes desses fertilizantes, sobretudo o N_2O .

A aplicação parcelada de nitrogênio durante o ciclo da cana-de-açúcar poderá ser uma importante medida de mitigação das emissões de GEE nessa cultura, pois quando altas doses desse elemento são aplicadas, elas provavelmente superam a demanda em nitrogênio da cultura e o excedente desse nutriente fica disponível aos microrganismos que, dependendo das condições do meio, poderá ser transformado em formas gasosas, como N_2O (MORO, 2012), que é o principal GEE emitido a partir de fertilizantes nitrogenados.

A expectativa é que a fertirrigação por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar venha a mitigar a emissão de GEE em sistemas agrícolas, especialmente, N_2O que é o principal GEE emitido a partir de fertilizantes nitrogenados. Essa técnica, ao permitir o parcelamento desse nutriente e a aplicação diretamente no sistema radicular da cultura, poderá disponibilizar menos nitrogênio aos microrganismos.

Na literatura disponível sobre esse assunto vários são os estudos que se propuseram a avaliar o efeito de diferentes doses de fertilizantes nitrogenados sobre as emissões de GEE em cana-de-açúcar não irrigada (BARBOSA, 2014; CARMO et al., 2013; MORO, 2012; SIGNOR et al., 2013; PAREDES et al., 2014), porém, não há estudos sobre a emissão desses gases em cana-de-açúcar fertirrigada. Diante da falta de resultados na literatura, é importante avaliar o impacto da fertilização nitrogenada sobre a emissão de GEE na produção de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial com diferentes doses de nitrogênio.

Neste contexto, o estudo tem como objetivo quantificar o efeito da aplicação de nitrogênio, por meio de diferentes doses, sobre as emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina-PI, situada nas coordenadas geográficas de 5°05'S, 42°29'W e 72 m de altitude (Figura 1). O clima local, segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather, é definido como Megatérmico Subúmido Seco, com excedente hídrico

moderado no verão (C1sa'a'), com temperatura média anual de 28,2 °C e precipitação média anual de 1.343,4 mm (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2014).

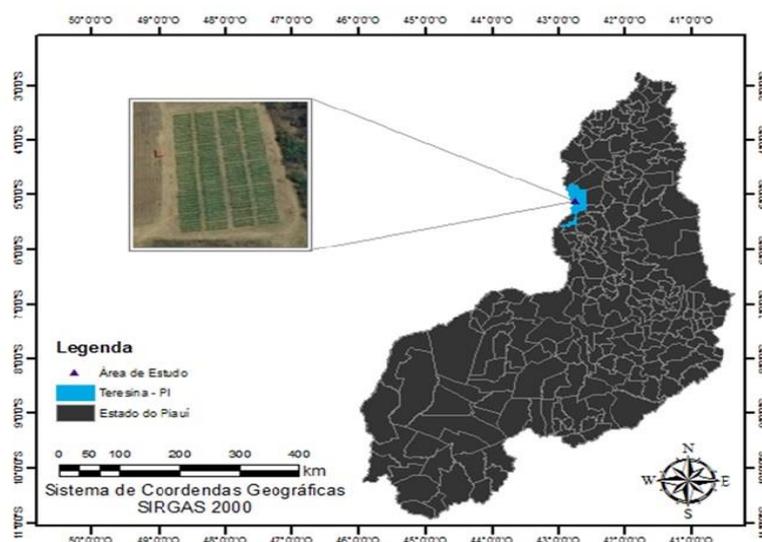


Figura 1: Mapa do Piauí com destaque para o município de Teresina e localização da área de estudo

O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico (MELO et al., 2014). Antes da calagem, foram coletadas amostras de solo na área experimental para caracterização química e físico-hídrica nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e físico-hídrica da área, antes da implantação do experimento, Teresina, PI, 2014¹.

Camada (m)	MO	Ph	P	Ca	Mg	K	Na	CTC	V
	g kg ⁻¹	H ₂ O	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³			%
0 - 0,2	13,88	5,76	16,21	1,21	0,69	0,23	0,02	5,43	39,6
0,2 - 0,4	7,64	5,22	13,56	0,38	0,11	0,07	0,02	4,40	13,2
Camada (m)	Densidade	Areia			Silte	Argila	Classe textural	Θ _{cc}	Θ _{mp}
	Mg m ⁻³	g kg ⁻¹						m ³ m ⁻³	
0 - 0,2	1,43	609,7			278,8	111,5	Franco-arenoso	0,245	0,055
0,2 - 0,4	1,60	626,0			225,3	148,8	Franco-arenoso	0,245	0,081

¹ Amostra de solo coletada antes da calagem. Θ_{cc}: capacidade de campo (6 kPa); Θ_{mp}: ponto de murcha permanente (1.500 kPa).

O estudo foi realizado em área com cana-de-açúcar, cultivo RB 92579, no ciclo de cana-planta. Antes do plantio da cana-de-açúcar, a área foi cultivada durante sete anos com pinhão manso. Após a retirada do pinhão manso, foi aplicado 2 (dois) Mg ha⁻¹ de Calcário (PRNT= 90%). O preparo do solo constou de uma aração, posterior gradagem e abertura dos sulcos de plantio. O plantio foi realizado em junho de 2014,

de forma manual na profundidade de 0,3m, sendo distribuído de 5 a 6 toletes, com 3 (três) gemas cada, por metro linear.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com quatro repetições e parcelas subdivididas. As parcelas foram constituídas pela combinação de quatro doses de N e K₂O na forma de ureia e Cloreto de Potássio, respectivamente (0 – 0; 60 -120; 120 - 180 e 180 - 120 kg ha⁻¹) e as subparcelas, por duas épocas de coleta de GEE (C1 - coleta ante da fertirrigação e C2 - coleta depois da fertirrigação). As parcelas foram constituídas de 3 (três) fileiras duplas de plantio, com 10m de comprimento (área total de 60 m²). Cada linha dupla de plantio apresentava espaçamento de 2m entre si, medido a partir do centro da fileira dupla. O espaçamento entre as fileiras de plantas na linha dupla foi de 0,5 m e de 1,5 m entre as fileiras de plantas vizinhas (1,5 x 0,5 m) (Figura 2).

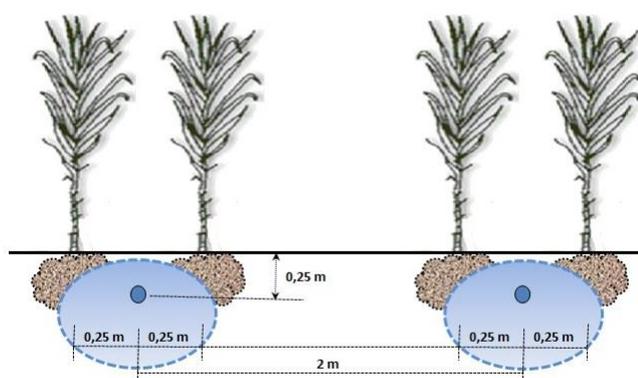


Figura 2. Esquema do espaçamento em linha dupla, profundidade e ponto de instalação da fita gotejadora.

A fertirrigação teve início no dia 01 de agosto de 2014 (60 dias após o plantio) e foi até meados de janeiro de 2015, da seguinte forma: N- 15% (dentro do mês de agosto); 20% (dentro do mês de setembro); 25% (dentro do mês de outubro); 20% (dentro do mês de novembro); 15% (dentro do mês de dezembro) e 5% (dentro do mês de janeiro); Para o K₂O – 30% foram aplicados em fundação e os 70% restante foram aplicados via fertirrigação, sendo 10% (dentro do mês agosto); 15% (dentro do mês setembro); 20% (dentro do mês outubro); 25% (dentro do mês novembro); 20% (dentro do mês dezembro); 10% (dentro do mês janeiro). As fertirrigações com N e K₂O foram realizadas uma vez por semana, sempre no turno da manhã e cada operação de fertirrigação teve duração média de uma hora. Ao longo dos seis meses de fertirrigação, foram realizadas 24 aplicações (ANDRADE JÚNIOR et al., 2012).

As adubações com outros nutrientes foram uniformes em todas as parcelas. O Fósforo (P) foi aplicado na dose 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 (30% em fundação, fonte superfosfato triplo, e 70% via fertirrigação, na forma de fosfato monoamônico), com aplicações mensais. Os micronutrientes Boro (B), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Molibdênio (Mo) foram aplicados via fertirrigação em seis aplicações durante o ciclo da cultura.

A fertirrigação foi realizada aplicando-se ureia e cloreto de potássio, após diluição em tanque de 50L, adicionando-os ao sistema de irrigação por meio de injetor hidráulico de deslocamento positivo (bomba TMB). O controle de abertura e fechamento das parcelas no campo, para administração das lâminas de irrigação e das doses de nitrogênio e potássio, foi efetuado por registros hidráulicos, instalados em cavaletes, nas entradas de cada uma das parcelas. A lâmina de irrigação aplicada foi monitorada por um hidrômetro, localizado na casa de bomba.

A lâmina de irrigação foi uniforme e aplicada com base na Evapotranspiração de Referência (ET_o), estimada pelo método de Penman - Monteith e coeficientes de cultivo (K_c) de cana-de-açúcar, determinados na região (0,9 na fase de rápido crescimento; 1,32 na fase de máximo desenvolvimento; e 0,82 na fase de maturação fisiológica) (NOLÊTO, 2015), em escala de tempo diária, utilizando dados climáticos de uma estação meteorológica automática localizada próxima à área experimental. A frequência de aplicação da irrigação seguiu os seguintes dias da semana: às segundas-feiras, às quartas-feiras e às sextas-feiras, da seguinte forma: na segunda-feira, aplicou-se a ET_c, acumulada de sexta, sábado e domingo; na quarta-feira aplicou-se a ET_c, acumulada de segunda e terça-feira e, na sexta-feira, aplicou-se a ET_c, acumulada de quarta e quinta-feira.

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, com dois metros entre linhas gotejadoras e, em cada linha gotejadora, gotejadores com vazão de $2,3 \text{ L h}^{-1}$, pressão de 200 kPa a cada 0,6m, enterradas a 0,25 m de profundidade, no centro das fileiras duplas de plantas (Figura 2).

As avaliações das emissões de N_2O , CO_2 e CH_4 , decorrentes da aplicação dos tratamentos, iniciaram-se em agosto de 2014 (81 dias após o plantio, quando já haviam sido aplicadas três fertirrigações) e foram concluídas em janeiro de 2015 (230 dias após o plantio), totalizando 5 (cinco) coletas (antes da fertirrigação e depois da

fertirrigação), obedecendo a curva de aplicação dos nutrientes, durante o ciclo da cultura (Figura 3).

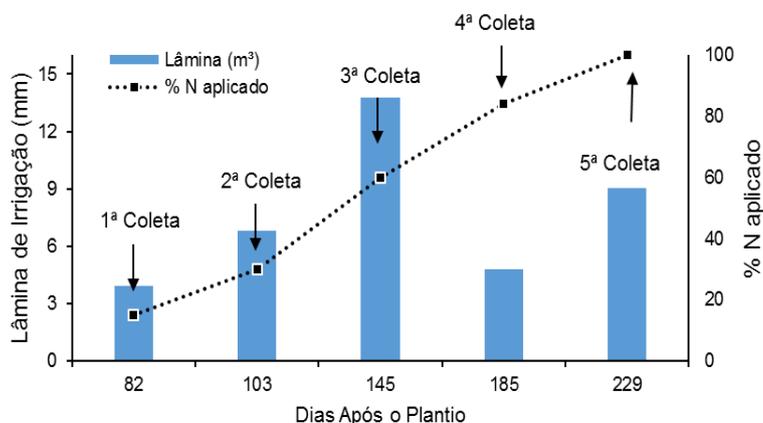


Figura 3 – Lâmina de irrigação e distribuição acumulada de N aplicado via fertirrigação por gotejamento subsuperficial ao longo ciclo.

As medições dos fluxos de N_2O , CO_2 e CH_4 foram feitas com o uso de câmaras estáticas, constituídas por uma base retangular metálica, com dimensões de 0,4 x 0,6 m, com altura de 0,15 m, parcialmente enterrada ao solo (0,05 m), instalada no início do experimento e mantida fixas até o final do período de avaliação. Uma tampa de PVC era encaixada na base no momento da coleta das amostras, contendo uma abertura superior para o acoplamento da seringa utilizada nas coletas. Na extremidade superior da base metálica, para facilitar o encaixe da tampa de PVC, havia uma calha de 0,03 m de altura, em que uma pequena quantidade de água era colocada para assegurar a perfeita vedação da câmara no momento da coleta das amostras.

A base da câmara foi instalada um dia antes do início das coletas, no centro da parcela experimental, entre as fileiras duplas de plantio, sobre a linha de gotejamento subsuperficial. Para a estimativa das emissões de N_2O , CO_2 e CH_4 foi utilizada uma câmara estática por unidade experimental, o que totalizou 16 câmaras no ensaio.

As coletas foram realizadas um dia antes (C1) e um dia depois da fertirrigação (C2). Elas foram realizadas pela manhã. Durante o período de coleta, foram monitoradas a temperatura e umidade do solo (Figura 4). A umidade do solo foi obtida por gravimetria, a partir de amostras de solo (0-0,1m) coletadas ao lado da câmara no momento das coletas de gases e posteriormente secas em estufa a $105^\circ C$ até peso constante. A temperatura do solo foi medida por meio de um termômetro que era

inserido no momento das coletas nos primeiros 0,10 m de profundidade do solo ao lado da câmara.

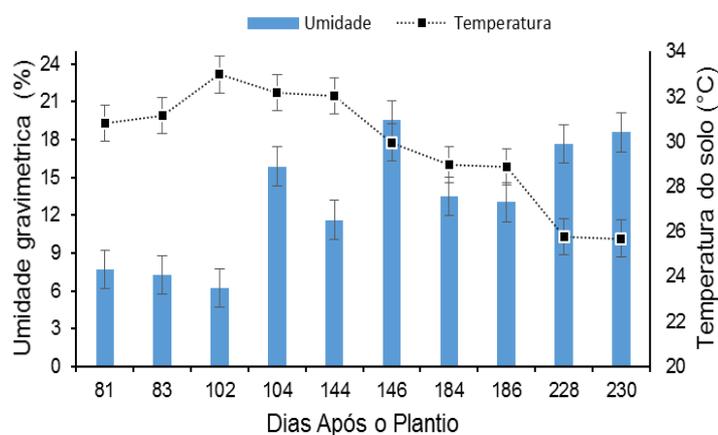


Figura 4 - Umidade e temperatura média diária do solo na área experimental; barras verticais indicam o erro padrão da média de quatro observações.

Para a avaliação dos fluxos de N_2O , CO_2 e CH_4 foram coletadas três amostras de gases, com auxílio de uma seringa de 60 mL em cada câmara. Imediatamente após o fechamento da câmara, coletava-se a primeira amostra (tempo zero); aos dez minutos após o fechamento da câmara era coletada a segunda amostra (tempo 10) e aos trinta minutos após o fechamento da câmara era coletada a terceira amostra (tempo 30). Após a coleta, as amostras de GEE eram transferidas para frascos de vidro lacrados com septo de borracha e lacre de alumínio, previamente identificados e pré-evacuados.

A análise das amostras foi realizada, por cromatografia gasosa. O cromatógrafo modelo Trace 1310 GC era equipado com colunas empacotadas (pré-coluna e coluna analítica) de injeção automática, com Detector de Captura de Elétrons (ECD) operando a $350^\circ C$, que quantifica o N_2O e com Detector por Ionização de Chama (FID) operando a $250^\circ C$, utilizado para determinar a concentração de CO_2 e CH_4 .

As variações nas concentrações de N_2O , CO_2 e CH_4 nas amostras em função do tempo após o fechamento da câmara (0, 10 e 30 minutos), associada às informações do volume e da área da câmara e da temperatura do solo, foram utilizadas para o cálculo dos fluxos de cada gás. Os fluxos de N_2O , CO_2 e CH_4 $\mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$ foram determinados pela equação 1 (JANTALIA et al., 2008).

$$F = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{M}{V_m}$$

Eq. 1

Onde: F é o fluxo de cada gás; $\Delta c/\Delta t$ é a mudança de concentração do gás na câmara no intervalo de tempo de incubação; V e A são, respectivamente, o volume da câmara, em litros (L), e a área de solo coberta pela câmara, em m^2 ; M é a massa molecular dos átomos de N, na molécula de N_2O , e C nas moléculas de CO_2 e CH_4 ; V_m é o volume molar do gás na temperatura de amostragem ($22,4 \mu L \mu mol^{-1}$, nas CNTP).

Os fluxos diários de N_2O , CO_2 e CH_4 foram tabulados em planilha eletrônica. Inicialmente, multiplicaram-se os fluxos obtidos por 24, para obter o fluxo diário. Em seguida, obteve-se a emissão acumulada no período por meio da integração trapezoidal dos fluxos diários em função do tempo para cada parcela experimental (SIGNOR et al., 2014).

Os dados de temperatura média do ar e de precipitação pluvial (ocorrida durante o período de avaliação) foram obtidos da Estação Meteorológica do INMET (Figura 5).

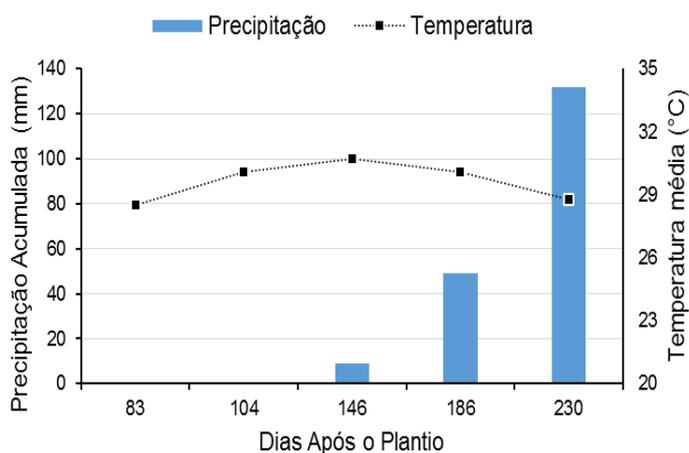


Figura 5 – Precipitação acumulada e temperatura média mensal na área experimental de agosto de 2014 a janeiro de 2015.

Realizou-se a análise de resíduos dos dados para todos os caracteres, com a finalidade de avaliar a existência de dados discrepantes, a heterocedasticidade da variância e o ajuste dos erros a uma distribuição aproximadamente normal (NOGUEIRA, 2007).

As diferenças entre as emissões acumuladas dos GEE foram analisadas estatisticamente por meio da análise de variância entre os tratamentos e as coletas de amostragem nas parcelas, seguindo a metodologia de Zimmermann (2004). Foram utilizados contrastes na comparação de médias para a emissão acumulada por coleta de amostragem. Foram realizadas também análises de correlação entre os fluxos de CH_4 , CO_2 e N_2O versus temperatura do solo, umidade gravimétrica e doses de

nitrogênio. Todas as análises foram realizadas utilizando-se o software SAS 14.1(SAS INSTITUTE, 2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os fluxos de CH₄ correlacionaram-se negativamente com as doses de nitrogênio, na terceira e quarta coletas. As emissões CH₄ mostraram correlação negativa com a umidade do solo apenas na terceira coleta, quando foi aplicado maior volume de água (Figura 4). Essa situação corrobora com o fato da oxidação de CH₄ ser fortemente regulada pelo conteúdo de água no solo, devido ao controle da difusão de CH₄ e O₂. Por esse motivo, são frequentes os resultados de correlação negativa entre umidade do solo e taxa de oxidação de CH₄. Para os fluxos de CO₂ nenhuma correlação foi encontrada entre doses de nitrogênio e umidade e temperatura do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson para os fluxos de CH₄, CO₂ e N₂O em relação as doses de N, temperatura e umidade do solo medida a 0,10m de profundidade.

	CH ₄				
	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta	4ª coleta	5ª coleta
Dose de N	-0,15859	0,04254	-0,60562**	-0,36016*	-----
Temperatura	-0,26262	0,16503	0,24974	0,28531	-----
Umidade	0,05880	-0,36535*	-0,37245*	-0,24019	-----
	CO ₂				
	Dose de N	-0,17334	0,16062	-0,05821	0,21035
Temperatura	-0,08352	0,01880	-0,04166	-0,09152	0,13326
Umidade	0,22430	0,17281	0,18225	0,06485	-0,18971
	N ₂ O				
	Dose de N	0,48214**	0,62790**	0,35689*	0,31633
Temperatura	-0,13074	-0,31990	-0,39593*	-0,30503	0,16273
Umidade	0,26028	0,30636	0,46609**	0,12544	0,12245

*:Significativo a (0,05 ≥ p>0,01) e ** Significativo a (p ≤ 0,01).

Os fluxos de N₂O correlacionaram-se positivamente com dose de nitrogênio até a terceira coleta e, com a umidade do solo, foi verificada correlação negativa na terceira coleta. Quanto à temperatura do solo, foi verificada correlação negativa na terceira coleta.

As amostras de solo e a temperatura do solo foram coletadas e medidas na camada de 0,1m de profundidade, respectivamente, e a fita gotejadora foi instalada a 0,25 m. Acredita-se que a baixa ou falta de correlação entre essas variáveis versus os fluxos de N₂O, CO₂ e CH₄ deu-se em função dessa diferença de profundidade de amostragem.

Os fluxos de CH₄, em todos os tratamentos, foram em geral baixos e oscilaram entre valores positivos e negativos, com valor máximo de 0,1437 mg m⁻² h⁻¹ ocorrendo no T1, aos 146 DAP e valor mínimo de -0,0064 mg m⁻² h⁻¹, evidenciado no T4 aos 83 DAP (Figura 6). Esse comportamento indica ter havido emissão e oxidação de CH₄ pelo solo. Em todos os tratamentos, embora em pequena magnitude, o solo comportou-se como dreno de CH₄ atmosférico e foi constatada maior frequência de fluxo negativo (oxidação) nos tratamentos que receberam as maiores doses de nitrogênio (T3 e T4).

Resultados de estudos com cana-de-açúcar, irrigada e não irrigada, apresentaram comportamento semelhante ao verificado na Figura 6, com variações próximas de zero e efeito sumidouro em alguns cultivos (BARBOSA, 2014; CARMO et al., 2013; MORO, 2012; VARGAS, 2014).

O fluxo máximo de 0,1437 mg m⁻² h⁻¹ foi medido em T1 aos 146 DAP quando também verificou-se maior percentual de umidade no solo (Figura 4). A emissão de CH₄ é fortemente regulada pela umidade do solo, devido à água no solo exercer controle na difusão de CH₄ e na disponibilidade de O₂. Assim, aumentando a umidade no solo, diminui a taxa de oxidação e aumenta a emissão de CH₄.

Por sua vez, o uso de fertilizante nitrogenado pode ter aumentado a taxa de oxidação de CH₄ no solo nos tratamentos T3 e T4, ao promover maior crescimento vegetativo, uma vez que esses tratamentos receberam as maiores doses de nitrogênio, o que pode ter gerado aumento na evapotranspiração (ET) e reduzido a porosidade total preenchida com água (BODELIER; LAANBROEK, 2004), pois o aumento da ET da cultura eleva a extração de água do solo, aumentando o espaço poroso do solo livre de água (maior aeração), promovendo maior difusão de CH₄ e O₂, condições que favorecem a oxidação de CH₄ no solo.

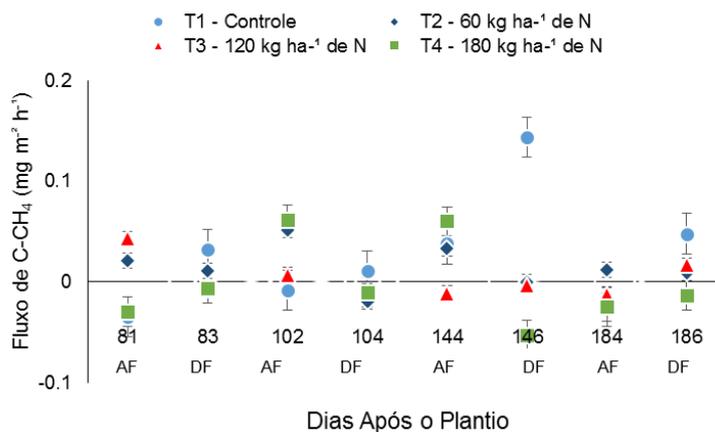


Figura 6. Fluxo de C-CH₄ em cana-de-açúcar fertilizada por gotejamento subsuperficial; barras verticais indicam o erro padrão da média de quatro observações. AF- coleta antes da fertirrigação; DF- coleta depois da fertirrigação.

A fertilização nitrogenada influencia a taxa de oxidação de CH₄ no solo, através da competição do íon NH₄⁺ com o CH₄ pela enzima monooxigenase. Após adubações nitrogenadas elevadas ocorre no solo uma maior concentração de NH₄⁺ disponível e, com isso, ao competir pela enzima, esse íon atua como inibidor da oxidação de CH₄ nos solos (BOECKX et al., 1997). Entretanto, neste estudo, a aplicação parcelada do nitrogênio pode ter reduzido a concentração do íon NH₄⁺ no solo, impedindo, assim, a competição deste com o CH₄ pela enzima monooxigenase.

O efeito do nitrogênio sobre a oxidação de CH₄ em solos não é claro e, principalmente, em regiões com cultivo de cana-de-açúcar (MORO, 2012), uma vez que o efeito de aplicação de nitrogênio na oxidação desse gás depende do tipo e da quantidade de N adicionado, bem como de fatores relacionados ao solo, tais como: pH, temperatura, umidade e difusão do gás.

O comportamento dos fluxos de CO₂ durante o período experimental foi similar entre os tratamentos (Figura 7) com os maiores valores, sendo obtidos aos 146 DAP e, com queda, até atingirem os valores mínimos médios aos 230 DAP. Esse decréscimo ocorreu provavelmente devido à diminuição das atividades microbiana e das raízes, devido à redução na temperatura do solo (Figura 4) (BARBOSA, 2014). O início do período chuvoso na região e o sombreamento do solo pelas folhas das plantas na área podem ter contribuído para reduzir a temperatura do solo aos 230 DAP. Acréscimo na temperatura do solo podem acelerar a atividade dos microrganismos, porém decréscimo podem representar redução na atividade desses microrganismos e consequente redução das emissões de CO₂ para a atmosfera.

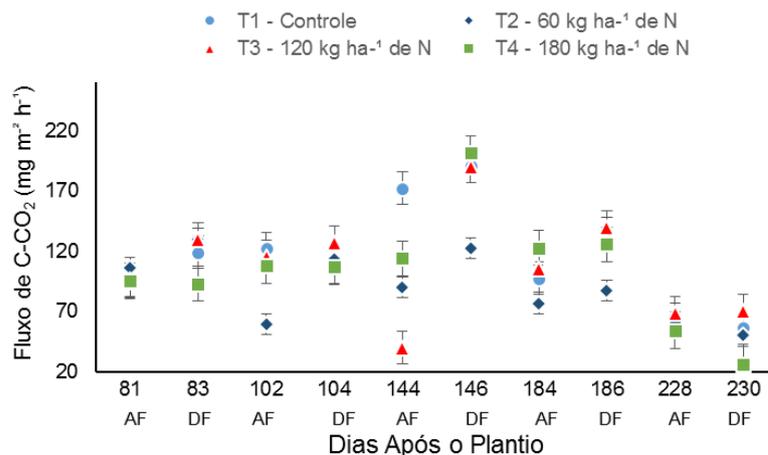


Figura 7. Fluxo de C-CO₂ em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial; barras verticais indicam o erro padrão da média de quatro observações. AF- coleta antes da fertirrigação; DF- coleta depois da fertirrigação.

Por meio da dinâmica do fluxo de N₂O (Figura 8) verificou-se maior incremento no fluxo de N₂O, aos 146 DAP, quando já havia sido aplicado 60% das doses de nitrogênio e também quando foi aplicado maior volume de água (Figura 3). O fluxo máximo de 137,2 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ foi verificado em T4(180 kg ha⁻¹ de N). Em geral, após a fertirrigação, os fluxos de N₂O apresentaram ligeiro incremento em relação às coletas realizadas antes da fertirrigação. Esses pequenos incrementos, imediatamente após a fertilização (fertirrigação), devem-se ao parcelamento da dose de nitrogênio, como também foi constatado por Kennedy et al. (2013).

O aumento da taxa de aplicação de nitrogênio, dependendo da disponibilidade de carbono do solo, pode aumentar exponencialmente a emissão de N₂O (KIM et al., 2013). Assim, o parcelamento do nitrogênio pode reduzir as emissões de N₂O, dependendo das condições ambientais.

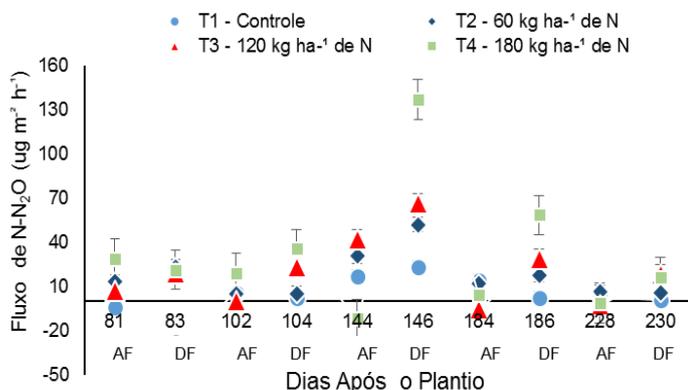


Figura 8. Fluxo de N-N₂O em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial; barras verticais indicam o erro padrão da média de quatro observações. AF- coleta antes da fertirrigação; DF- coleta depois da fertirrigação.

Diversos estudos com cana-de-açúcar relatam aumento do fluxo de N_2O após a fertilização nitrogenada (CARMO et al., 2013; SIGNOR et al., 2013; BARBOSA, 2014; PAREDES et al., 2014; SOARES et al., 2015), no qual é atribuído a maior disponibilidade de nitrogênio para os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, são responsáveis pela produção de N_2O no solo (JUMADI et al., 2008; ZAMAN et al., 2008; SIGNOR et al., 2013; ZHANG et al., 2014).

Os tratamentos T2 (60 kg ha⁻¹) e T3 (120 kg ha⁻¹) em geral apresentaram fluxos maiores que o tratamento controle, embora muito parecidos entre si, mostrando que, para doses de até 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio na forma de ureia, aplicado via fertirrigação por gotejamento subsuperficial, os incrementos nos fluxos de N_2O são pequenos. Ao longo do período de avaliação, embora com pouca frequência, foram registrados valores negativos de fluxo de N_2O para os tratamentos T1, T3 e T4.

Em T3 e T4 a ocorrência de fluxos negativos (consumo de N_2O) foi registrada nas avaliações realizadas antes da fertirrigação, devido à baixa disponibilidade de nitrogênio no solo, uma vez que a frequência de aplicação deste nutriente era semanal. As avaliações realizadas antes da fertirrigação eram feitas 7 (sete) dias após a aplicação anterior do fertilizante. Fluxos negativos de N_2O têm sido relatados nas mais variadas condições, frequentemente (mas nem sempre) associados à baixa disponibilidade de nitrogênio no solo e condições favoráveis para reduzir o N_2O a N_2 (CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

A ocorrência de fluxo negativo também depende de propriedades do solo, umidade e temperatura do solo, pH e disponibilidade de Carbono orgânico e nitrogênio (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). A partir de 186 DAP, os fluxos declinaram e foram similares, independente do tratamento e da coleta. As baixas emissões verificadas nesse período podem ser atribuídas à baixa disponibilidade de nitrogênio no solo.

A análise de variância indicou uma interação significativa para o efeito de coleta dentro do tratamento para emissões acumuladas de N- N_2O , C- CO_2 e C- CH_4 na coleta C1 (antes da fertirrigação) e C2 (depois da fertirrigação), indicando que a estratégia adotada para a coleta dos gases em dois momentos (C1 e C2) foi adequada para se avaliar o efeito de doses de nitrogênio aplicadas via fertirrigação por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar (Tabela 3). Esse resultado é importante, tendo em vista que a literatura não aborda com clareza a forma como as emissões de GEE devem ser quantificadas em sistemas fertirrigados.

Tabela 3. Quadrados médios para emissão acumulada de N-N₂O, C-CO₂ e C-CH₄ referente as doses de N (kg ha⁻¹) em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial¹.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios		
		N-N ₂ O	C-CO ₂	C-CH ₄
Bloco	3	0,0131**	17319,303 ^{ns}	0,0011 ^{ns}
Trat. (T)	3	0,0833**	128580,984**	0,0356**
Erro (a)	9	0,0133	38605,907	0,0028
Coleta d. T1	1	0,0064 ^{ns}	12340 ^{ns}	0,1347**
Coleta d. T2	1	0,0103*	120379*	0,0468**
Coleta d. T3	1	0,0901**	733702**	0,0048**
Coleta d. T4	1	0,3531**	289700**	0,1200**
Erro (b)	12	0,0017	18253,567	0,00051

¹T1 – controle; T2 – 60 kg ha⁻¹ de N; T3 – 120 kg ha⁻¹ de N; T4 – 180 kg ha⁻¹ de N. ns: Não significativo (p > 0,05); *:Significativo a (0,05 ≥ p > 0,01) e **Significativo a (p ≤ 0,01), pelo teste F.

Na comparação dos tratamentos fertirrigados versus a testemunha dentro da C1 para emissão acumulada de CH₄, apenas o efeito médio de T1 vs T3 não foi significativo. Dentre os tratamentos fertirrigados, apenas o efeito médio de T2 vs T4 não apresentou diferença significativa (Tabela 4).

Tabela 4. Diferenças entre médias dos tratamentos referente à emissão acumulada de C-CH₄ (g m⁻²) em função de doses de N e K₂O (kg ha⁻¹) quantificadas antes e após a fertirrigação, dentro de cada coleta, em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial¹.

Contrastes	C-CH ₄	
	Médias	Efeito do contraste
T1 vs T2 d. C1	0,02457 vs 0,14806	-0,1234**
T1 vs T3 d. C1	0,02457 vs 0,02825	-0,0036 ^{ns}
T1 vs T4 d. C1	0,02457 vs 0,14729	-0,1227**
T2 vs T3 d. C1	0,14806 vs 0,02825	0,1198**
T2 vs T4 d. C1	0,14806 vs 0,14729	0,0007 ^{ns}
T3 vs T4 d. C1	0,02825 vs 0,14729	-0,1190**
T1 vs T2 d. C2	0,28411 vs - 0,00506	0,2891**
T1 vs T3 d. C2	0,28411 vs - 0,02075	0,3048**
T1 vs T4 d. C2	0,28411 vs - 0,09772	0,3818**
T2 vs T3 d. C2	- 0,00506 vs - 0,02075	0,0156 ^{ns}
T2 vs T4 d. C2	- 0,00506 vs - 0,09772	0,0926**
T3 vs T4 d. C2	- 0,02075 vs - 0,09772	0,0769*

¹T1: controle; T2: 60-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O; T3 – 120-180 kg ha⁻¹ de N e K₂O; T4 – 180-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O. ns: Não significativo (p > 0,05); *:Significativo a (0,05 ≥ p > 0,01) e **Significativo a (p ≤ 0,01), pelo teste t.

Dentro da C2, apenas o efeito médio contraste T2 vs T3 mostrou não haver diferença significativa (Tabela 4). Nos tratamentos que foram fertilizados, independentemente da dose de nitrogênio aplicada, funcionaram como dreno de CH₄, ou seja, oxidaram CH₄. Em contrapartida, o tratamento controle emitiu em média 0,325 g m⁻² de CH₄ a mais que os tratamentos adubados. O T2 oxidou em média 0,0926 g m⁻² de CH₄; já o T3 oxidou em média 0,0769 g m⁻² de CH₄ na comparação com o T4. Entretanto, o T4, mesmo recebendo a maior dose de N (180 kg ha⁻¹), oxidou em média 0,097 g m⁻² de CH₄.

Os tratamentos fertilizados funcionaram como dreno de CH₄ dentro da C2, ou seja, oxidaram mais do que emitiram; entretanto, dentro da C1, emitiram mais CH₄ do que oxidaram. Esses resultados indicam que a irrigação isolada afetou a taxa de oxidação de CH₄ pelo solo.

A oxidação de CH₄ é comumente relatada em condições de solos de sequeiro (WANG; ZHENG, 2012). Nessas condições, bactérias aeróbicas metanotróficas utilizam o CH₄ como fonte de carbono e energia, conduzindo a oxidação do CH₄ até CO₂ (MORO, 2012). Em estudo com a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial, Barbosa (2014) verificou que os tratamentos avaliados apresentaram comportamento sumidouro de CH₄, corroborando os resultados obtidos no presente estudo.

Resultados de pesquisas apontam que a aplicação de nitrogênio no solo tem inibido (WANG; INESON, 2003), estimulado (WEIER, 1999;) ou não tem efeito (WANG; ZHENG, 2012; VARGAS, 2014) sobre a emissão de Metano. Portanto, ainda não é claro o efeito da fertilização nitrogenada sobre a emissão de CH₄ em solo sob cultivo de cana-de-açúcar.

Para emissão acumulada de CO₂ dentro da C1, apenas o efeito médio de T1 vs T2 e T1 vs T3 apresentaram efeito significativo. Em relação aos contrastes dentro da C2, verificaram-se que apenas os contrastes T2 vs T3 e T2 vs T4 apresentaram-se altamente significativos para emissão acumulada de CO₂ (Tabela 5). Esses resultados demonstram que o efeito da fertilização nitrogenada, aplicada via fertirrigação, sobre a emissão de CO₂, em solos sob o cultivo de cana-de-açúcar, não é claro.

Tabela 5. Diferenças entre médias dos tratamentos referente a emissão total de N-N₂O e C-CO₂ (g m⁻²) em função de doses de N e K₂O (kg ha⁻¹) quantificadas antes e após a fertirrigação, dentro de cada coleta, em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial¹.

Contrates	Médias		Efeito do Contraste	
	C-CO ₂	N-N ₂ O	C-CO ₂	N-N ₂ O
T1 vs T2 d. C1	1020,169 vs 636,831	0,088 vs 0,126	383,338**	-0,037 ^{ns}
T1 vs T3 d. C1	1020,169 vs 597,919	0,088 vs 0,080	422,249**	0,007 ^{ns}
T1 vs T4 d. C1	1020,169 vs 781,425	0,088 vs 0,098	238,743 ^{ns}	-0,009 ^{ns}
T2 vs T3 d. C1	636,831 vs 597,919	0,126 vs 0,080	38,911 ^{ns}	0,045 ^{ns}
T2 vs T4 d. C1	636,831 vs 781,425	0,126 vs 0,098	-144,594 ^{ns}	0,028 ^{ns}
T3 vs T4 d. C1	597,919 vs 781,425	0,080 vs 0,098	-183,506 ^{ns}	-0,017 ^{ns}
T1 vs T2 d. C2	1098,718 vs 882,166	0,031 vs 0,198	216,552 ^{ns}	-0,166*
T1 vs T3 d. C2	1098,718 vs 1203,601	0,031 vs 0,300	-104,883 ^{ns}	-0,268**
T1 vs T4 d. C2	1098,718 vs 1162,017	0,031 vs 0,518	-63,298 ^{ns}	-0,486**
T2 vs T3 d. C2	882,166 vs 1203,601	0,198 vs 0,300	-321,436*	-0,101 ^{ns}
T2 vs T4 d. C2	882,166 vs 1162,017	0,198 vs 0,518	-279,851*	-0,320**
T3 vs T4 d. C2	1203,601 vs 1162,017	0,300 vs 0,518	41,584 ^{ns}	-0,218**

¹T1: controle; T2: 60-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O; T3: 120-180 kg ha⁻¹ de N e K₂O; T4: 180-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O. ns: Não significativo (p > 0,05); *: Significativo a (0,05 ≥ p > 0,01) e **: Significativo a (p ≤ 0,01), pelo teste t.

O efeito médio dos contrastes para emissão acumulada de N₂O dentro da C1, mostrou não haver diferença significativa entre os tratamentos fertirrigado e o controle, nem entre tratamento fertirrigado (Tabela 5). Esse comportamento indica que, como a frequência de aplicação dos fertilizantes foi semanal, não houve contribuição da aplicação anterior dos fertilizantes na quantificação dos fluxos da semana seguinte, indicando que a aplicação parcelada dos fertilizantes reduziu os fluxos de GEE a tal ponto de não haver emissão significativa de N₂O uma semana após sua aplicação.

Isso demonstra que os fluxos de N₂O foram rápidos e de baixa intensidade em função do pequeno percentual de nitrogênio aplicado via fertirrigação e pela elevada umidade do solo. A umidade do solo, juntamente com a forma (substância) e o modo de aplicação do fertilizante, determina a duração das altas emissões de N₂O logo após a fertilização (DAVIDSON et al., 1996).

Dentro da C2, apenas o efeito médio de T2 versus T3 não apresentou diferença significativa. O efeito médio de T1 versus T4 e T2 versus T4 apresentaram maior emissão acumulada de N₂O e iguais a 0,48656 e 0,3202 g m⁻², respectivamente. Esse resultado já era esperado, uma vez que o tratamento T4 recebeu a maior dose de nitrogênio (180 kg ha⁻¹), resultando em maior disponibilidade desse nutriente para os

processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, que são responsáveis pela produção de N_2O no solo (JUMADI et al., 2008; ZAMAN et al., 2008; SIGNOR et al., 2013; ZHANG et al., 2014).

Os resultados obtidos nesse estudo indicam que, em sistemas fertirrigados, os fluxos de N_2O são de baixa intensidade e curta duração. Não foi verificado efeito significativo da emissão acumulada de N_2O dentro da C1, demonstrando que, cerca de sete dias após aplicação do fertilizante, independente da dose de nitrogênio, o efeito sobre a emissão de N_2O foi estatisticamente igual para todos os tratamentos avaliados.

4 CONCLUSÕES

A fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar aplicada via fertirrigação por gotejamento subsuperficial não influenciou as emissões de CH_4 e CO_2 durante o período de avaliação.

Os fluxos diários de N_2O e CH_4 correlacionaram-se com as doses de nitrogênio, temperatura e umidade do solo. Para os fluxos de CO_2 , nenhuma correlação foi verificada entre as doses de nitrogênio, temperatura e umidade do solo.

O aumento da dose de nitrogênio de 60 kg ha^{-1} para 120 kg ha^{-1} não afetou a emissão de N_2O , enquanto que, o aumento da dose de 120 kg ha^{-1} para 180 kg ha^{-1} , proporcionou um aumento de 58% na emissão total de N_2O .

5 REFERÊNCIAS

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 78-84, 2012.

BARBOSA, E. A. A. **Sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial**. 2014.135p. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BASTOS, E.A.; ANDRADE JUNIOR, A.S. **Boletim agrometeorológico de 2013 para o município de Teresina, Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 38p (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 228).

BODELIER, P. L. E.; LAANBROEK, H. J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 47, p. 265-277, 2004.

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.49, n.1-3, p. 91-95, 1997.

CARMO, J. B.; FILOSO, S. ZOTELLI, L. C.; 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. E. NETO, NETO, A. E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emission from sugarcane soil in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop strash accumulation. **GCB Bioenergy**, v.5, n.3, p.267-280, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB, 2015. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 2, n. 2, Brasília, 2015. Disponível em <http://www.conab.gov.br>>acesso em 20/02/2016.

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.; BERNOUX, M. Soil, a sinkfor? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

DAVIDSON, E. A.; MATSON, P. A.; BROOKS, P.D. Nitrous oxide emission controls and inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 4, p. 1145-1152, 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC, 2007. Climate change 2007: The physical science basis. **Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: p. 1-18. In S. SOLOMON, S. et al. (ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

_____.IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G-K.; ALLEN, M. S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JANTALIA, C.P.; 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**, v.82, p.161-173, 2008.

JUMADI, O.;HALA, Y.;MUIS, A.;ALI, A.;PALENNARI, M.; YAGI, K.;INUBUSHI, K. Influences of chemical fertilizers and a nitrification inhibitor on greenhouse gas fluxes

in a corn (*Zea mays* L.) field in Indonesia. **Microbes Environ**, v.34, p. 23-29–34, 2008.

KENNEDY, T. L.; SUDDICKB, E. C.; SIX, J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 170, p. 16-27, 2013.

KIM, D.-G.; HERNANDEZ-RAMIREZ, G.; GILTRAP, D. Linear and nonlinear dependency of direct nitrous oxide emissions on fertilizer nitrogen input: A meta-analysis. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 168, p. 53-65, 2013.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília – DF, 2013, 76 p.

MELO, F.B.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; PESSOA, B.L.O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

NOGUEIRA, M.C.S. **Experimentação agrônômica I: conceitos, planejamento e análise estatística**. Piracicaba: M. C. S. Nogueira, 2007. 479p.

NOLÊTO, D.H. **Coeficiente de cultura e demanda hídrica da cana-de-açúcar na microrregião de Teresina, Piauí**. 2015. 91p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PAREDES, D. S.; LESSA, A. C. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. **Nutr Cycl Agroecosyst**, v. 98, p. 41-55, 2014.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.1 User's Guide**. Cary, 2015. Disponível em: <http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/68162/PDF/default/statug.pdf>. Acesso em: 26 jan., 2016.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, 2013.

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**, Campinas, v. 73, n. 2, p.113-122, 2014.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; CARMO, J. B.; MARTINS, A. A.; SOUSA, R. M.; ANDRADE, C. A. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. **Journal of environmental quality**, v. 44, n. 2, p. 423-430, 2015.

VARGAS, V. P. **Gases de efeito estufa de solos cultivados com cana-de-açúcar: manejo do nitrogênio e da palhada**. 2014. 262p. Tese (Doutorado) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.

WANG, Z. P.; INESON, P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 35, p. 427-433, 2003.

WANG, C. L. K.; ZHENG, X. Responses of N₂O and CH₄ fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an inated wheat-maize cropping syste in northerm China. **Biogeosciences**, v. 9, p. 839-850, 2012.

WEIR, K. L. N₂O and CH₄ emission and CH₄consumption in a sugarcane soil after variation in nitrogen and water application. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1931-1941, 1999.

ZAMAN, M.; NGUYEN, M.L.;BLENNERHASSETT, J.D.;QUIN, B.F. Reducing NH₃, N₂O and NO₃-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. **Biol. Fertil. Soils**, v. 44, p. 693-705, 2008.

ZHANG, X.; SUN, N.; DING, X.; LI, J.; WANG, B.; LI, D. Soil CO₂ and N₂O emissions in maize growing season under diferent fertilizer regimes in an upland red soil region of south China. **Journal of Integrative Agriculture**, v.13, p. 604-614, 2014.

ZIMMERMANN, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. 2. ed. rev. ampl. Brasília. DF: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2004. 582p.

CAPITULO II

Emissão de N₂O em cana-de-açúcar em resposta a aplicação de N por fertirrigação e via solo

RESUMO

O uso de fertilizantes nitrogenados tem contribuído de maneira significativa no aumento da produção de cana-de-açúcar. No entanto, esses fertilizantes são responsáveis pela elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo, o óxido nitroso (N₂O). O objetivo deste trabalho foi comparar as emissões de N₂O decorrentes da aplicação de diferentes doses de N em cana-de-açúcar fertirrigada, comparando-as às emissões provenientes da adubação convencional. O experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, Piauí, de agosto de 2014 a janeiro de 2015. O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, analisado em esquema fatorial (2 x 2) +1, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de duas doses de N e K₂O (60-120; 120-180 kg ha⁻¹) e duas formas de aplicação (adubação convencional – via solo e fertirrigação) e uma testemunha. Todas as parcelas dos tratamentos independente da forma de aplicação dos fertilizantes foram irrigadas por gotejamento subsuperficial. As amostragens de N₂O foram realizadas pelo método da câmara estática fechada e analisadas por cromatografia gasosa. Nos tratamentos fertirrigados as câmaras foram instaladas no centro da parcela experimental, entre fileiras duplas de plantio, sobre a linha de gotejamento subsuperficial. Nos tratamentos de adubação convencional (via solo) as câmaras foram instaladas no centro da parcela experimental, nas entrelinhas, sobre o sulco de adubação. A emissão acumulada de N₂O foi determinada por meio da integração trapezoidal dos fluxos diários em função do tempo. O uso da fertirrigação via gotejamento subsuperficial reduziu as emissões de N₂O em cana-de-açúcar em comparação ao cultivo irrigado e fertilizado de forma convencional, e pode ser considerado como opção para redução de emissões de N₂O. O aumento da dose de N de 60 para 120 kg ha⁻¹ aplicado via fertirrigação não afetou as emissões de N₂O, enquanto que aplicação de 60 e 120 kg ha⁻¹ aplicado de forma convencional (via solo) proporcionou aumento de 60,3% e 50,2% nas emissões de N₂O, respectivamente. A aplicação de 60 e 120 kg ha⁻¹ de N de forma convencional obtiveram maior fator de emissão de N₂O, sendo superior em 1,39% e 2,08% ao registrado no cultivo fertirrigado com 60 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*. Nitrogênio. GEE.

Emission of nitrous oxide in sugarcane in response to application of N by subsurface drip irrigation and into the soil

ABSTRACT

The use of nitrogen fertilizers has contributed significantly to the increase in sugarcane production. However, these fertilizers are responsible for raising greenhouse gas (GHG) emissions, especially nitrous oxide (N₂O). The objective of this work was to compare the N₂O emissions due to the application of different doses of N in fertirrigated sugarcane, comparing them to the emissions from conventional fertilization. The experiment was carried out at Embrapa Mid-North, Teresina, State of Piauí, Brazil, from August 2014 to January 2015. The soil in the area was classified as dystrophic Yellow Red Argissolo. The experimental design was a randomized block design, evaluated in a (2 x 2) +1 factorial scheme, with four replications. The treatments consisted in the combination of two doses of N and K₂O (60-120, 120-180 kg ha⁻¹) and two application ways (conventional - fertilization into the soil groove and fertigation) and one control. All plots, independent of the fertilizer application, were irrigated by subsurface drip irrigation. N₂O samplings were performed by the closed chamber static method and analyzed by gas chromatography. In the fertirrigated treatments the chambers were installed in the center of the experimental plot, between double rows of planting, on the subsurface drip line. In the conventional fertilization treatments the chambers were installed in the center of the experimental plot, between plant lines, on the fertilization groove. The cumulative emission of N₂O was determined by the trapezoidal integration of the daily flows as a function of time. The use of fertirrigation through subsurface drip reduced N₂O emissions in sugarcane compared to the irrigated and fertilized crop in a conventional way (into the soil), and can be considered as an option to reduce N₂O emissions. The increase of the N dose from 60 to 120 kg ha⁻¹ applied through fertigation did not affect N₂O emissions, whereas the application of 60 and 120 kg ha⁻¹ applied in a conventional way (into the soil) provided an increase of 60.3% and 50.2% in N₂O emissions, respectively. The application of 60 and 120 kg ha⁻¹ of N conventionally obtained higher N₂O emission factor, being superior in 1.39% and 2.08% registered in fertirrigado with 60 and 120 kg ha⁻¹ N, respectively.

Key words: *Saccharum officinarum*. Nitrogen. Greenhouse gas emission

1 INTRODUÇÃO

O óxido nitroso (N_2O) está entre os três gases de maior importância dentre os causadores do efeito estufa. Apesar de sua baixa concentração na atmosfera (324 ppb), possui alta capacidade de absorção de energia ultravioleta e alta estabilidade na atmosfera (JANTALIA et al., 2006; IPCC, 2013). A agricultura é considerada um dos setores que mais contribui para as emissões de N_2O .

Em âmbito global, estima-se que a agricultura contribui com cerca de 85% emissões totais de N_2O (IPCC, 2007). No Brasil, como reflexo da importância da agricultura como atividade econômica, estima-se que 93% do N_2O liberado para a atmosfera anualmente é proveniente da atividade agrícola (MCTI, 2013), sendo portanto, o GEE mais importante emitido a partir de solos agrícolas no Brasil (CERRI et al., 2009).

A queima de biomassa, combustão de combustíveis fósseis, urbanização e uso de fertilizantes nitrogenados são as principais fontes antropogênicas de N_2O (IPCC, 2007). A produção de N_2O no solo ocorre naturalmente, através dos processos biológicos de nitrificação e desnitrificação (KENNEDY et al., 2013). O uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura tem sido apontado como uma das principais causas pelo aumento de N_2O na atmosfera.

A quantidade de N_2O emitido pelo uso de fertilizantes nitrogenados, segundo a estimativa do IPCC, é de 1% do nitrogênio aplicado, embora a faixa de incerteza esteja entre 0,3% e 3% (IPCC, 2006). Porém, outros autores mostram que esse número pode ser maior, como no trabalho de Crutzen et al. (2008), em que foi indicado fator de emissão de 3% a 5% do nitrogênio aplicado. Os dados com o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil mostraram emissão de N_2O de 0,7% a 3% (CARMO et al., 2013) e 2,85% a 6,67% (SIGNOR et al., 2013) do nitrogênio aplicado, sendo essa variação decorrente das condições edafoclimáticas de cada local e o manejo adotado.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e seus derivados: açúcar e etanol. A cana-de-açúcar é uma cultura de grande destaque no cenário agrícola mundial, o que se deve à demanda por combustíveis renováveis, menos poluentes e menos onerosos que os combustíveis fósseis.

Nos últimos anos, a produção brasileira de cana-de-açúcar tem se expandido, estimulada, sobretudo, pelo incentivo ao consumo de combustíveis menos poluentes

como o etanol. Diante disso, é importante que sejam desenvolvidas pesquisas que visem diminuir os impactos ambientais gerados em decorrência do uso de fertilizantes nitrogenados ao longo do ciclo da cultura, buscando-se práticas de manejo que visem a mitigação das emissões de GEE promovida pelo uso desses fertilizantes.

Diversos estudos se propuseram a avaliar o efeito de diferentes doses de nitrogênio sobre as emissões de N₂O em cana-de-açúcar (BARBOSA, 2014; CARMO et al., 2013; MORO, 2012; SIGNOR et al., 2013), porém, não há estudos visando a emissão de N₂O associada à cana-de-açúcar fertirrigada. Nesse sentido, foi conduzido o presente estudo com o objetivo de comparar as emissões de N₂O decorrentes da aplicação de doses de nitrogênio em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial, comparando-as às emissões provenientes da adubação convencional (via solo).

2 MATERIAL E MÉTODOS

As emissões de N-N₂O foram estudadas em uma área de cultivo de cana-de-açúcar, variedade RB 92579, na fase de cana-planta, na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina-PI, cujas coordenadas geográficas são: latitude 5°05'S, e longitude 42°29'W, e altitude média de 72 m, em Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, textura Franco-Arenoso (MELO et al., 2014). A temperatura média anual é de 28,2°C e a precipitação média anual é de 1.343,4 mm (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2014).

Antes do plantio da cana-de-açúcar, a área foi cultivada com pinhão manso por sete anos. Após a retirada do pinhão manso, iniciou-se este experimento, sendo realizada amostragem de solo para a análise química (Tabela 1), posteriormente foram aplicados 2Mg ha⁻¹ de Calcário (PRNT = 90%).

O preparo do solo constou de uma aração, posterior gradagem e abertura dos sulcos de plantio. O plantio foi realizado em junho de 2014, de forma manual, na profundidade de 0,3 m em relação à superfície do solo, com 6 (seis) toletes, contendo 3 (três) gemas cada um por metro linear. As parcelas foram constituídas de 3 (três) fileiras duplas de plantio, com 10m de comprimento. Cada linha dupla de plantio apresentava espaçamento de 2m entre si, medido a partir do centro da fileira dupla.

O espaçamento entre as fileiras de plantas na linha dupla foi de 0,5 m e de 1,5m entre as fileiras de plantas vizinhas.

Tabela 1. Características químicas do solo antes da implantação do experimento, em 2014.

Camada (m)	MO g kg ⁻¹	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	H+Al	Ca	Mg	K	Na	CTC	V %
				cmol _c dm ⁻³						
0 - 0,2	13,88	5,76	16,21	3,30	1,21	0,69	0,23	0,02	5,43	39,59
0,2 - 0,4	7,64	5,22	13,56	3,85	0,38	0,11	0,07	0,02	4,40	13,18
0,4- 0,6	6,46	5,28	12,77	4,73	0,42	0,10	0,12	0,04	5,37	12,63

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso, analisado em esquema fatorial (2 x 2) +1, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de duas doses de N e K₂O (60 – 120; 120 -180 kg ha⁻¹) e duas formas de aplicação (adubação convencional – via solo e fertirrigação) e uma testemunha. Todas as parcelas dos tratamentos, independente da forma de aplicação dos fertilizantes, foram irrigadas.

As adubações com outros nutrientes foram uniformes em todas as parcelas. Fósforo (P) foi aplicado 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, da seguinte forma: 30% em fundação (SFT-superfosfato triplo) e 70% via fertirrigação (Fosfato Monoamônico - MAP), com aplicações mensais. Nos tratamentos de adubação convencional o P foi todo aplicado em fundação, na forma de SFT. Os micronutrientes B, Zn, Mn, Cu e Mo foram aplicados via fertirrigação, divididos em seis aplicações.

Nos tratamentos fertirrigados, as aplicações dos fertilizantes foram divididas em 24 etapas durante o ciclo da cultura (Tabela 2), com intervalo de 7 (sete) dias entre as aplicações. A primeira aplicação ocorreu 60 dias após o plantio (DAP). Os tratamentos irrigados, mas com adubação convencional, tiveram as doses de N e K₂O aplicadas em duas etapas 50% aos 68 DAP e 50% aos 144 DAP de forma convencional (ANDRADE JÚNIOR et al., 2012).

A aplicação de N e K₂O nos tratamentos fertirrigados ocorreu simultaneamente. Foi utilizada a ureia como fonte de nitrogênio e o cloreto de potássio branco como fonte de K₂O. A ureia e o cloreto de potássio eram diluídos em tanque de 50L e adicionados ao sistema de irrigação por meio de um injetor hidráulico de deslocamento positivo (bomba TBM).

Tabela 2. Parcelamento da fertirrigação e suas respectivas doses proporcionais.

	Aplicação (%)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	3,75	3,75	3,75	3,75	5,0	5,0	5,0	5,0	6,25	6,25	6,25	6,25
K ₂ O*	2,5	2,5	2,5	2,5	3,75	3,75	3,75	3,75	5,0	5,0	5,0	5,0
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	5,0	5,0	5,0	5,0	3,7	3,7	3,7	3,7	1,3	1,3	1,3	1,3
K ₂ O*	6,25	6,25	6,25	6,25	5,0	5,0	5,0	5,0	2,5	2,5	2,5	2,5

* 30% da dose de K₂O foi aplicado em fundação para tratamento de adubação via solo e via fertirrigação

Nos tratamentos com adubação convencional, a ureia e o cloreto de potássio branco foram aplicados em sulco (0,05 m) abertos ao lado das linhas de plantio, distribuindo-se os fertilizantes de forma homogênea, com posterior fechamento dos sulcos. Em seguida, para que fosse assegurado o umedecimento do solo, foram adicionados dois litros de água por metro de sulco. Essa medida foi adotada por acreditar que o bulbo molhado, formado a partir do gotejamento subsuperficial, não atingiria os sulcos de adubação que ficavam situados ao lado da linha dupla de plantio, já que a linha de irrigação era localizada no centro da linha dupla de plantio.

A lâmina de irrigação foi uniforme e aplicada com base na evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pelo método de Penman - Monteith e coeficientes de cultivo (K_c) de cana-de-açúcar, determinados na região (NOLÊTO, 2015), em escala de tempo diária, utilizando dados climáticos de uma estação meteorológica automática, localizada próxima à área experimental. A frequência de aplicação da irrigação realizou-se nos seguintes dias da semana: às segundas-feiras, às quartas-feiras e às sextas-feiras, da seguinte forma: na segunda-feira, aplicou-se a ET_c, acumulada de sexta, sábado e domingo; na quarta-feira, aplicou-se a ET_c, acumulada de segunda e terça-feira e na sexta-feira, aplicou-se a ET_c, acumulada de quarta e quinta-feira.

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, com 2 (dois) metros entre linhas gotejadoras (gotejadores a cada 0,60 m, vazão de 2,3 L h⁻¹, pressão de 200 kPa), enterradas a 0,25 m de profundidade, no centro das fileiras duplas de plantas.

O fluxo de N₂O foi estimado pelo método da câmara estática fechada, com análise da concentração do gás em cromatografia. As câmaras eram constituídas por uma base metálica parcialmente enterrada ao solo (0,05 m), instalada no início do

experimento e mantida fixa até o final do período de avaliação. No momento da coleta das amostras, a tampa era apoiada em uma canaleta de 0,03 m de altura presente na base, em que uma pequena quantidade de água era colocada para assegurar a perfeita vedação da câmara no momento da coleta das amostras.

As amostras de gás foram coletadas com o auxílio de seringa plástica de 60 mL e posteriormente injetadas em frascos de vidro de 20 mL, fechados com septos de borracha e lacre de alumínio. A coleta dos gases foi realizada após o fechamento da câmara nos tempos 0; 10 e 30 min, conforme metodologia descrita por Signor et al. (2014). Após a coleta os frascos, foram encaminhados para a Embrapa Cerrados, com a análise do gás em cromatógrafo gasoso, modelo Trace 1310 GC.

As variações nas concentrações de N₂O nas amostras em função do tempo após o fechamento da câmara (0, 10 e 30 minutos), associada às informações do volume e da área da câmara e da temperatura do solo, foram utilizadas para o cálculo do fluxo de N-N₂O em µg m⁻² h⁻¹ equação 1 (JANTALIA et al., 2008).

$$F = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{M}{V_m} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: F é o fluxo de cada gás; $\Delta c/\Delta t$ é a mudança de concentração do gás na câmara no intervalo de tempo durante a coleta; V e A são, respectivamente, o volume da câmara, em litros (L), e a área de solo coberta pela câmara, em m²; M é a massa molecular dos átomos de Nitrogênio, na molécula de N₂O; V_m é o volume molar do gás na temperatura de amostragem (22,4 µL µmol⁻¹, nas CNTP).

As avaliações das emissões de N₂O nos tratamentos fertirrigados foram realizadas aos 83, 104, 146, 186 e 230 DAP, um dia depois da fertirrigação, totalizando 5 (cinco) avaliações. Nos tratamentos de adubação convencional, as coletas de N₂O foram realizadas aos 69, 70, 73, para quantificar as emissões decorrentes da 1ª adubação de cobertura e aos 145, 146 e 147 DAP, para quantificar as emissões decorrentes da 2ª adubação de cobertura, totalizando 6 (seis) avaliações.

Nos tratamentos fertirrigados e testemunha, a base da câmara foi instalada no centro da parcela experimental, entre as fileiras duplas de plantio, sobre a linha de gotejamento superficial. Nos tratamentos de adubação convencional, a base foi instalada no centro da parcela experimental, nas entrelinhas, sobre o sulco de

adubação. Para estimativa das emissões de N_2O , foi utilizada uma câmara estática por repetição, o que totalizou 20 câmaras no ensaio.

Durante o período de coleta, foram monitoradas a temperatura e a umidade do solo. A umidade do solo foi obtida por gravimetria, a partir de amostras de solo (0-0,1m) coletadas ao lado da câmara no momento das coletas. A temperatura do solo foi medida por meio de um termômetro que era inserido nos primeiros 0,10 m de profundidade do solo no momento da coleta.

Os fluxos diários de N_2O foram tabulados em planilha eletrônica. Inicialmente, multiplicaram-se os fluxos obtidos por 24, para obter o fluxo diário. Em seguida, obteve-se a emissão acumulada no período por meio da integração trapezoidal dos fluxos diários em função do tempo, para cada parcela experimental (SIGNOR et al., 2014). Com a emissão acumulada de N_2O , foi possível calcular os Fatores de Emissão (FE) para cada dose de Nitrogênio aplicado. Esse cálculo foi realizado seguindo a metodologia proposta pelo IPCC equação 2 (2006).

$$FE_x = \frac{E_x - E_o}{N} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, FE_x é o Fator de Emissão de N_2O para cada dose de N aplicada (%); E_x é o fluxo de N_2O total para cada dose ($kg\ ha^{-1}$); E_o é a emissão de N_2O total para o tratamento controle ($kg\ ha^{-1}$); e N é a quantidade de nitrogênio aplicada via fertilizante ($kg\ ha^{-1}$).

As lâminas de irrigação aplicadas um dia antes das coletas e a precipitação pluviométrica acumulada na área experimental ao longo do período de avaliação são apresentadas na Figura 1.

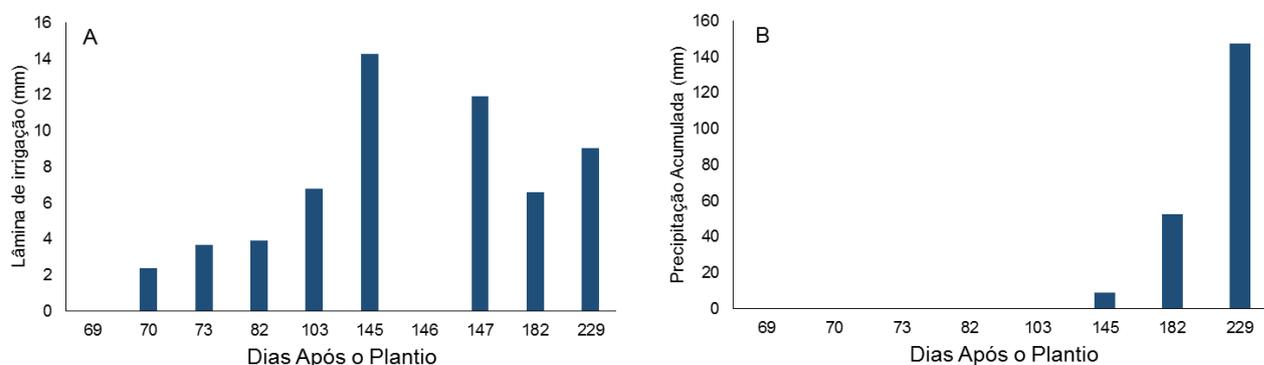


Figura 1. Lâminas de irrigação (A) e precipitação pluviométrica acumulada (B) na área experimental ao longo do período de avaliação.

Realizou-se a análise de resíduos da emissão total de N_2O , com a finalidade de avaliar a existência de dados discrepantes, a heterocedasticidade de variância e o ajuste dos erros a uma distribuição normal (NOGUEIRA, 2007). As diferenças entre as emissões acumuladas de N_2O foram analisadas estatisticamente por meio da análise de variância. Em função do teste t, foram estimados contrastes de interesse entre duas médias de emissão acumulada e o fator de emissão de N_2O . Todas as análises foram realizadas utilizando-se o *software* SAS 14.1 (SAS INSTITUTE, 2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variações de temperatura e umidade do solo nos tratamentos fertirrigados e de adubação convencional são apresentados na Figura 2. A menor temperatura do solo foi registrada aos 230 DAP durante as medidas nos tratamentos referentes à fertirrigação, quando a cultura já estava totalmente estabelecida com as folhas totalmente expandidas, sombreando o solo e evitando a incidência de radiação solar diretamente na superfície do solo. Além disso, o início do período chuvoso na região também contribui para reduzir a temperatura do solo.

Para os tratamentos de adubação convencional, a temperatura média do solo não variou entre os dias de coletas. A temperatura do solo exerce influência nos fluxos de N_2O , interferindo e limitando a atividade dos microrganismos do solo. A temperatura do solo afeta a taxa de conversão de compostos nitrogenados. Em temperaturas amenas, essa taxa é baixa, podendo aumentar à medida que a temperatura aumenta.

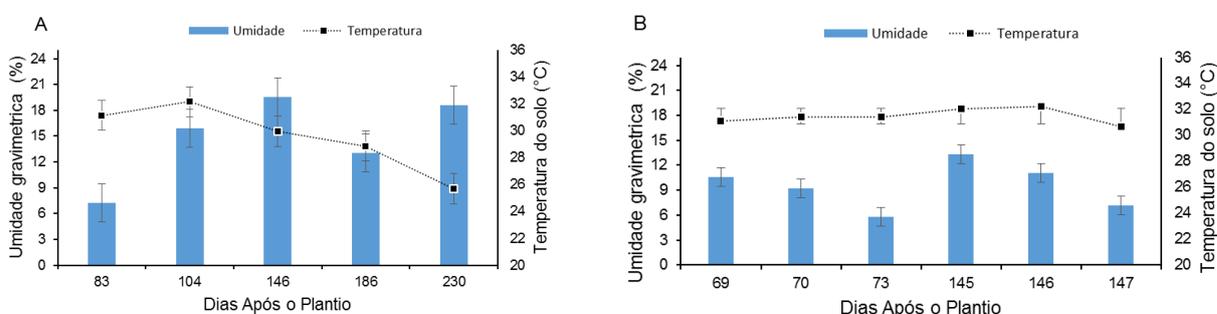


Figura 2. Umidade e temperatura do solo ao longo do período experimental no cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial (A) e adubação convencional (B); barras verticais indicam o erro padrão da média.

O maior percentual de umidade no solo foi registrado aos 146 DAP nos tratamentos fertirrigados, quando foi aplicado o maior volume de água via irrigação (Figura 1). Porém, nos tratamentos de adubação convencional, o maior percentual de umidade no solo foi verificado aos 145 DAP, quando foram coletadas as amostras de gás referentes à segunda adubação de cobertura.

A temperatura e a umidade do solo são fatores de grande importância para os processos de nitrificação e desnitrificação, uma vez que afetam a atividade dos microrganismos que realizam tais processos (GIACOMINI et al., 2006; CORRÊA et al., 2016).

Entre os tratamentos fertirrigados, os fluxos mais elevados de N_2O foram determinados aos 146 DAP (Figura 3A). O valor médio de umidade (19,5%) e temperatura do solo (30°C a 0,1m) podem ter contribuído para aumentar a emissão de N_2O medida um dia após a fertirrigação com nitrogênio, uma vez que, o aumento da umidade do solo, provoca acréscimo na quantidade de EPSA e tem efeito direto sobre a disponibilidade de O_2 (BRAGA et al., 2011), condições que favorecem o desenvolvimento dos microrganismos nitrificadores ou desnitrificadores no solo. Por outro lado, a temperatura do solo afeta a taxa de conversão de compostos nitrogenados. Em temperaturas amenas, essa taxa é baixa, podendo aumentar à medida que a temperatura aumenta.

Além da temperatura e umidade do solo, a disponibilidade de nitrogênio no solo é outro fator importante para as emissões de N_2O do solo por favorecer os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação (SMITH et al., 2003). Aos 146 DAP já havia sido aplicado 60% da dose de nitrogênio em cada tratamento. Portanto, a disponibilidade desse nutriente também favoreceu as emissões de N_2O nesse período.

Diversos estudos com adubação convencional relataram aumentos dos fluxos de N_2O após fertilização nitrogenada, seja mineral ou orgânica (CARMO et al., 2013; SIGNOR et al., 2013; MORO, 2012; PAREDES et al., 2014; SOARES et al., 2015), corroborando os resultados verificados neste estudo.

Aos 83 DAP, verificaram-se a ocorrência de fluxo negativo de N_2O no tratamento controle (T1), a baixa disponibilidade de nitrogênio no solo e o baixo percentual de umidade (7,3%) podem ter favorecido a ocorrência de fluxo negativo, uma vez que todas essas verificações se traduzem em fatores que podem ter

favorecido a ocorrência de fluxo negativo nesse tratamento. A ocorrência de fluxos negativos de N_2O pode estar associada a erros de leituras de baixa concentração de N_2O e a condições de baixa disponibilidade de nitrogênio no solo, especialmente na forma de NO_3^- (RAMULU et al., 2009; CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

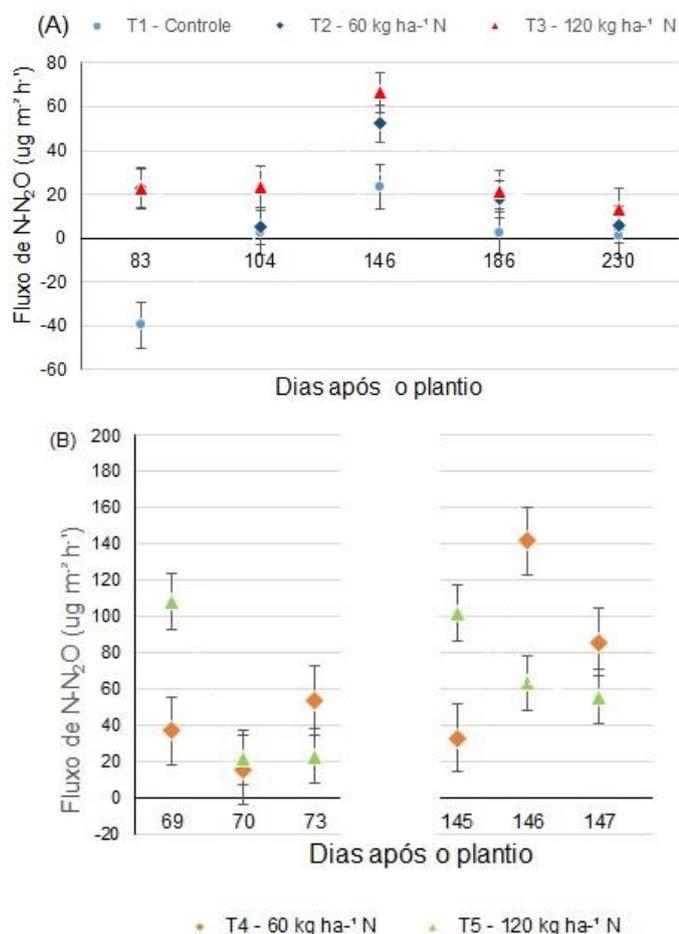


Figura 3. Fluxo de $N-N_2O$ em cultivo de cana-de-açúcar fertilirrigada por gotejamento subsuperficial (A) e adubação convencional (B). Barras verticais indicam o erro padrão da média de quatro observações.

Nos tratamentos de adubação convencional, o fluxo máximo de N_2O referente à primeira adubação de cobertura, foi verificado em T6 ($108,33\ \mu g\ N\ m^{-2}\ h^{-1}$) no primeiro dia após a aplicação do fertilizante. Em T5, o fluxo de $53,50\ \mu g\ N\ m^{-2}\ h^{-1}$ foi quantificado no terceiro dia após a fertilização. Já nas coletas referentes à segunda adubação de cobertura, o fluxo máximo de N_2O foi determinado em T5 ($141,59\ \mu g\ N\ m^{-2}\ h^{-1}$) 2 (dois) dias após a fertilização (Figura 3B).

Em geral, os maiores fluxos de N_2O ocorreram nos tratamentos de adubação convencional (Figuras 3A e 3B). Porém, acredita-se que o período de coleta após aplicação do fertilizante de 3 (três) dias para adubação convencional e 1 (um) dia para

fertirrigação não foi suficiente para a quantificar as emissões induzidas pela ureia. Diversos estudos verificando o efeito da fertilização nitrogenada aplicada de forma convencional sobre a emissão de N_2O constataram emissões induzidas pelo fertilizante até 30 dias após a fertilização (CARMO et al., 2013; SIGNOR et al., 2013; MORO, 2012).

Signor et al. (2013), em estudo realizado no ciclo da segunda cana-soca, em Piracicaba - SP, constataram que a emissão induzida pela ureia ocorreu a partir do quarto dia após a aplicação do fertilizante. Os autores verificaram fluxo máximo de $2528,69 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para a dose de 120 kg ha^{-1} Ureia vinte dias após aplicação do fertilizante. Carmo et al. (2013), aplicando 60 kg ha^{-1} de nitrogênio no ciclo da cana-planta, constataram fluxo máximo na linha de plantio próximo a $1250 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$, quinze dias após a adubação de cobertura.

Carvalho et al. (2006) avaliaram as emissões de N_2O no período imediatamente e até 5 (cinco) dias depois da fertilização em cobertura com ureia (60 kg ha^{-1} de N) em milho, e encontraram concentrações de N_2O abaixo do nível de detecção por cromatografia. Segundo os autores, a ureia não afetou as emissões de N_2O . Entretanto, o limitado período de avaliação após a aplicação do fertilizante considerado por esses autores, pode não ter sido suficiente para observar os efeitos da ureia sobre os fluxos de N_2O no solo.

A Tabela 3 apresenta os quadrados médios para a emissão total de N- N_2O quantificado ao longo do ciclo da cana-de-açúcar em resposta às doses de nitrogênio, na forma de ureia, aplicadas via fertirrigação por gotejamento subsuperficial e por adubação convencional (via solo). Verificaram-se que os tratamentos mostraram-se significativos para a emissão acumulada de N_2O , o que indica que houve variação entre as doses de Nitrogênio e a forma de aplicação entre os tratamentos.

Tabela 3. Resumo da análise de variância (quadrados médios) referente às emissões acumuladas de N_2O (g m^{-2}) dos tratamentos fertirrigados, adubação convencional e testemunha sem adubação¹.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios
		N- N_2O
Bloco	3	0,0135*
Tratamento (T)	4	0,1043**
Erro	12	0,00979
CV (%)	-----	24,33

¹ ns: Não significativo ($p > 0,05$); e **Significativo a ($p \leq 0,01$), pelo teste F.

Comparando-se os tratamentos fertirrigados e de adubação via solo versus a testemunha, no que se refere à emissão acumulada de N-N₂O, observa-se que houve diferença significativa entre as doses de nitrogênio e a testemunha, bem como entre a forma de aplicação do fertilizante (Tabela 4).

O efeito de T2 versus T3 não apresentou diferença significativa, indicando que aplicação de até 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cana-de-açúcar via fertirrigação por gotejamento subsuperficial apresentou emissão acumulada de N-N₂O semelhante a T2 (60 kg ha⁻¹ de Nitrogênio via fertirrigação).

Já o efeito médio da emissão acumulada de T2 vs T5 (60 kg ha⁻¹ de N) e T3 vs T4 (60 kg ha⁻¹ de N) foi significativo entre esses tratamentos que receberam a mesma dose de nitrogênio, porém, aplicado de forma diferente, indicando que a forma de aplicação desse nutriente, mesmo para doses baixas, tem efeito sobre a emissão total de N-N₂O.

Tabela 4. Diferenças entre médias dos tratamentos referente a emissão acumulada de N-N₂O (g m⁻²) em função de diferentes doses de N e K₂O (kg ha⁻¹) no cultivo de cana-de-açúcar, fertirrigada por gotejamento subsuperficial e com adubação convencional.

Contrastes	N-N ₂ O	
	Médias	Estimativa
T2 vs T1	0,198 vs 0,030	0,168**
T3 vs T1	0,234 vs 0,030	0,203**
T4 vs T1	0,328 vs 0,030	0,298**
T5 vs T1	0,466 vs 0,030	0,436 **
T3 vs T2	0,234 vs 0,198	0,036 ns
T4 vs T2	0,328 vs 0,198	0,130*
T5 vs T3	0,466 vs 0,234	0,232**
T5 vs T4	0,466 vs 0,328	0,138**

¹T1: Testemunha (sem fertilizante); T2 (60-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O) e T3(120-180 kg ha⁻¹ de N e K₂O): Tratamentos fertirrigados; T4 (60-120 kg ha⁻¹ de N e K₂O) e T5 (120-180 kg ha⁻¹ de N e K₂O): Tratamentos de adubação convencional. ns: Não significativo (p > 0,05); *:Significativo a (0,05 ≥ p > 0,01) e **Significativo a (p ≤ 0,01), pelo teste t.

Os tratamentos fertirrigados com 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio apresentaram reduções de 60,3% e 50,2%, respectivamente, nas emissões acumuladas de N-N₂O ao longo ciclo em relação aos seus correspondentes de adubação convencional, minimizando a poluição atmosférica e reduzindo as perdas de nitrogênio no sistema produtivo (BARBOSA, 2014).

As emissões de N₂O são menores quando o fertilizante é aplicado a 0,10m de profundidade em comparação com a aplicação na superfície do solo ou a 0,05m de

profundidade. A aplicação a 0,10m ou 0,25m de profundidade, via fertirrigação, aumenta o tempo de residência de N₂O no solo, aumentando também a probabilidade de sua redução a N₂ (CHAPUIS-LARDY et al., 2007).

O efeito médio de T4 vs T5 proporcionou diferença significativa entre esses tratamentos, pois T5 apresentou aumento 70,3% na emissão acumulada de N-N₂O em relação a T4. Esse aumento possivelmente se deu em função da maior dose de nitrogênio aplicada em T4, disponibilizando mais nitrogênio para os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação, resultando em maior emissão de N₂O ao longo do ciclo da cultura nesse tratamento.

O Fator de Emissão (FE) mostrou-se ter sido afetado ($0,05 \geq p > 0,01$) pelos tratamentos (doses de N) e formas de aplicação do fertilizante (fertirrigado versus convencional) (Tabela 5).

Tabela 5. Quadrados médios referentes ao FE de N₂O (%) decorrente da aplicação de doses de N e forma de aplicação (fertirrigados versus adubação convencional)¹.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios
		FE (%)
Bloco	3	1,040 ^{ns}
Tratamento (T)	3	5,112 ^{**}
Erro	9	0,3139

¹ ns: Não significativo ($p > 0,05$); e ^{**}Significativo a ($p \leq 0,01$), pelo teste F.

Nos tratamentos que foram fertilizados via fertirrigação, a proporção de nitrogênio perdida com N₂O foi significativamente inferior aos seus correspondentes fertilizados de forma convencional (Tabela 6).

O efeito médio de T2 versus T4 e T3 versus T5 mostrou-se significativo, indicando que aplicação de 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de N, via adução convencional, às perdas de nitrogênio, na forma de N₂O, foram 1,39% e 2,08% superiores à aplicação via fertirrigação, com aumentos de 67,3% e 44,87% das perdas, respectivamente, em relação a seus correspondentes fertirrigados.

A aplicação de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio via fertirrigação apresentou menor FE (1,69%), valor próximo do estabelecido pelo IPCC (2006) que é de 1%, e abaixo do verificado por Signor et al. (2013), aplicando 90,120 e 180 kg N ha⁻¹ no ciclo de segunda-soca de cana-de-açúcar não irrigada, em Piracicaba -SP, onde obtiveram FE de 3,59, 6,67 e 4,31%, respectivamente.

Tabela 6. Fator de emissão (FE) de N₂O associado a doses de N (kg ha⁻¹) aplicadas em cultivo de cana-de-açúcar por fertirrigação versus adubação convencional.

Contrastes	FE (%)	
	Médias	Estimativa
T2 vs T4	2,871 vs 4,267	- 1,395**
T3 vs T5	1,694 vs 3,775	- 2,080**

¹T2 - 60 kg ha⁻¹ de N; e T3 - 120 kg ha⁻¹ de N :Tratamentos fertirrigados; T4 - 60 kg ha⁻¹ de N e T5 - 120 kg ha⁻¹ de N: Tratamentos de adubação convencional. **Significativo a (p ≤ 0,01), pelo teste t.

Por outro lado, a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N de forma convencional (via solo) apresentou FE de 4,26%, valor acima do estabelecido pelo IPCC (2006) e do verificado por Lisboa et al. (2011) ao realizar uma pesquisa de revisão deste fator em cultivo de cana-de-açúcar, os quais reportaram FE de 3,87%. Signor et al. (2013), fornecendo ureia como fonte de nitrogênio (60 kg ha⁻¹), verificaram FE acima do indicado pelo IPCC (2006), com valor de 2,85%. Carmo et al. (2013), aplicando a mesma dose de Nitrogênio, obtiveram FE próximo ao indicado pelo IPCC, com valor de 1,1%.

Todos os fatores de emissão encontrados neste trabalho superaram o valor proposto pelo IPCC, embora alguns esteja dentro da faixa de incerteza. Os altos fatores de emissão verificados neste estudo podem estar associados às condições quentes (clima) e úmidas (irrigação) durante a condução do experimento (WANG et al., 2012).

É importante destacar que as informações que servem de referência para estimar ou quantificar o impacto de práticas agrícolas nas emissões de GEE, fornecidas pelo IPCC, estão baseadas na literatura disponível, que em sua maioria, procedem de regiões temperadas, com condições edafoclimáticas muito diferentes das observadas nas regiões tropicais. Por isso, atualmente, relata-se que muitos dos FE propostos pelo IPCC não se aplicam totalmente às condições tropicais (URQUIAGA et al., 2010), já que a emissão de N₂O varia muito em função das condições edafoclimáticas de cada região ou local.

Portanto, tornam-se necessários mais estudos para aprimorar as estimativas da emissão de N₂O, referente à aplicação de diferentes doses de nitrogênio, via fertirrigação em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, nas condições tropicais e subtropicais.

4 CONCLUSÕES

O uso da fertirrigação via gotejamento subsuperficial reduziu as emissões de N₂O em cana-de-açúcar em comparação ao cultivo irrigado e fertilizado de forma convencional (via solo) e pode ser considerado como opção para redução de emissões de N₂O.

O aumento da dose de nitrogênio de 60 kg ha⁻¹ para 120 kg ha⁻¹, aplicada via fertirrigação, não afetou as emissões de N₂O, enquanto que, a aplicação de 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de forma convencional, proporcionou aumento de 60,3% e 50,2% nas emissões de N₂O, respectivamente.

A aplicação de 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de N de forma convencional (via solo) obtiveram maior fator de emissão de N₂O, sendo superior a 1,39% e 2,08% ao registrado no cultivo fertirrigado com 60 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de Nitrogênio, respectivamente.

5 REFERÊNCIAS

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 78-84, 2012.

BARBOSA, E. A. A. **Sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial**. 2014.135p. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BASTOS, E.A.; ANDRADE JUNIOR, A.S. **Boletim agrometeorológico de 2013 para o município de Teresina, Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 38p (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 228).

CARMO, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 267-280, 2013.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.; BERNOUX, M. Soil, a sink for? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; KOZOVITS, A. R.; MIRANDA, L. N.; VIVALDI, L. J.; SOUSA, D. M. Emissão de óxidos de nitrogênio associada à aplicação de uréia sob plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.4, p.679-685, 2006.

CORRÊA, R. S.; MADARI, B. E.; CARVALHO, G. D.; COSTA, A. R.; PEREIRA, A. C. C.; MADEIROS, J. C. Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1148-1155, 2016.

CRUTZEN, P.J.; MOSIER, A.R.; SMITH, K.A.; WINIWARTER, W. N₂O release from agro bio-fuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 389-395, 2008.

GIACOMINI, S. J.; JANTALIA, C. P.; AITA, S.; 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**, v. 41, p. 1653-1661, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC, 2006. **Guidelines for national greenhouse gas inventory: Agriculture, forestry and other land use**, v.4. 2006.

_____.IPCC, 2007. Climate change 2007: The physical science basis. **Summary for policymakers. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: p. 1-18. In S. SOLOMON, S. et al. (Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

_____.IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: STOCKER, T.F. et al. (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; SANTOS, H P.; TORRES, E.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Em Busca da Mitigação da Produção de Óxido Nitroso em Sistemas Agrícolas: Avaliação de Práticas Usadas na Produção de Grãos no sul do País. In: ALVES, B.J. R.; URQUIAGA, S.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Porto Alegre: Gênese, v.1, p. 81-108, 2006.

JANTALIA, C.P.; 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**, v.82, p.161-173, 2008.

KENNEDY, T. L.; SUDDICKB, E. C.; SIX, J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 170, p. 16-27, 2013.

LISBOA, C. C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouses gases – Known and unknowns. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 3, p. 277-292, 2011.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2013, 76 p.

MELO, F.B.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; PESSOA, B.L.O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

MORO, V. J. **Emissão de gases de efeito estufa na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo e doses de nitrogênio**. 2012. 64p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

NOGUEIRA, M.C.S. **Experimentação agrônômica I: conceitos, planejamento e análise estatística**. Piracicaba, 2007. 479p.

NOLÊTO, D.H. **Coeficiente de cultura e demanda hídrica da cana-de-açúcar na microrregião de Teresina, Piauí**. 2015. 91p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PAREDES, D. S.; LESSA, A. C. R.; SANT'ANNA, S. A. C.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R. Nitrous oxide emission and ammonia volatilization induced by vinasse and N fertilizer application in a sugarcane crop at Rio de Janeiro, Brazil. **Nutr Cycl Agroecosyst**, v. 98, p. 41-55, 2014.

RAMULU, T. S.; SAHOO, S. K.; MOHAPATRA, R. K.; CHAUDHURY, G. R.; DAS, S. N. Emission of N₂O on pulse–rice crop rotation in upland. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 12, p. 2087-2090, 2009.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.1 User's Guide**. Cary, 2015. Disponível em: <http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/68162/PDF/default/statug.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2016.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, 2013.

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**, v. 73, n. 2, p.113-122, 2014.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 4, p. 779-791, 2003.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; CARMO, J. B.; MARTINS, A. A.;

SOUSA, R. M.; ANDRADE, C. A. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. **Journal of environmental quality**, v. 44, n. 2, p. 423-430, 2015.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. **Informações Agronômicas nº 130**, p. 12-21, 2010.

WANG, W.J.; SALTER, B.; REEVES, S.H.; BRIEFFIES, T.C.; PERNA, J. Nitrous oxide emissions from a sugarcane soil under different fallow and nitrogen fertiliser management regimes. **Proc Aust Soc Sugar Cane Technol**, v. 34, 2012.