

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA ALVES IBARR

EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO E EFICIÊNCIA DE USO DO
NITROGÊNIO APÓS APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO DE
EFICIÊNCIA AUMENTADA EM CULTIVO DE EUCALIPTO

CURITIBA

2020

MARIANA ALVES IBARR

EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO E EFICIÊNCIA DE USO DO
NITROGÊNIO APÓS APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO DE
EFICIÊNCIA AUMENTADA EM CULTIVO DE EUCALIPTO

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,
Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência
do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientadores: Dra. Josiléia Acordi Zanatta
Dra. Krisle Silva

CURITIBA

2020

Ibarr, Mariana Alves

Emissão de óxido nitroso do solo e eficiência de uso do nitrogênio após aplicação de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada em cultivo de eucalipto. / Mariana Alves Ibarr. - Curitiba, 2020.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo.
Orientador: Jeferson Dieckow.

Coorientadores: Josiléia Acordi Zanatta; Krisle Silva

1. Eucalipto - Cultivo. 2. Solos - Adubação. 3. Fertilizantes nitrogenados. 4. Gases estufa. 5. Manejo do solo. I. Dieckow, Jeferson. II. Zanatta, Josiléia Acordi. III. Silva, Krisle. IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de MARIANA ALVES IBARR intitulada: EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO E EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO APÓS APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE NITROGENADO COM EFICIÊNCIA AUMENTADA EM CULTIVO DE EUCALIPTO, sob orientação do Prof. Dr. JEFERSON DIECKOW, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2020.


JEFERSON DIECKOW

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


JAMES STAHL

Avaliador Externo (KLÁBIN S.A/FATEB)


ELOÁ MOURA ARAUJO

Avaliador Interno Pós-Doc (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


MURILO VELOSO GOMES

Avaliador Externo (UNIVER. FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Ao meu amado Jesus.

AGRADECIMENTOS

E aqui estou fazendo os agradecimentos destes quatro anos de trabalho! A primeira coisa que penso é que estou onde eu deveria estar. Quando eu estava estudando o ensino médio, sempre fiquei impressionada como as atividades que realizamos pode provocar mudanças no clima.

Na graduação me apaixonei por solos florestais, e ao trabalhar com iniciação científica acabei trabalhando com os gases de efeito estufa do solo. No meu sonho de graduanda, a melhor vida seria trabalhar na Embrapa Florestas em área relacionada à pesquisa que eu estava ajudando a desenvolver ou em uma empresa florestal grande.

E aconteceu que Deus surpreendeu, uniu a empresa grande com o centro de pesquisa com os gases de efeito estufa em solos florestais. Que realização! Como resultado deste sonho tenho uma dissertação de mestrado e agora minha tese de doutorado! Meu coração não cabe no peito de tamanha gratidão!

Sou muito feliz e grata a Deus que meus agradecimentos serão em forma de oração. Pai, te agradeço pela vida que me deste, pela saúde e provisão para chegar até aqui. Te agradeço porque lá em 2007 o Senhor colocou a Melissa em minha vida para me instigar a estudar e orientar meus passos!

Te agradeço pela vida de meus pais Paula e Evanir e Anaurelino e Marta e de minha irmã Paolla, que apesar de não entenderem muito sobre o tema de estudo de minha tese, sempre tiveram o coração aberto para apoiar meus sonhos!

Senhor, agradeço o acolhimento da Universidade Federal do Paraná e a provisão da bolsa de estudos da CAPES.

Pai, sou grata pela vida dos meus orientadores Jeferson, Josiléia e Krisle. Obrigada Deus por ter colocado essas pessoas de bom coração e excelência em tudo que fazem para me orientar desde o mestrado. Quem diria eu trabalhando com a Josiléia Zanatta, a moça que trabalhou com gases de efeito estufa na UFRGS! Ela era minha inspiração na graduação e continua sendo!

Obrigada Senhor pelos professores que compartilharam do seu conhecimento e contribuíram muito para o meu crescimento. Obrigada pela vida da Denise Senhor. Ela sempre nos ajudou com os trâmites burocráticos e sempre ofereceu sua amizade.

Sou grata pela vida das pessoas do grupo de pesquisa e aos colegas da pós Bruna, Carol, Felipe, Kellyn, Nádia e Ricardo. Obrigada por ter colocado pessoas dispostas a me ajudar nos apuros de trabalho intenso e ao mesmo tempo amigos.

Pai, te agradeço pela oportunidade de realizar parte de meu estudo na Klabin. Obrigada pela vida do James, do Sr. Luis Carlos e de sua equipe por disponibilizarem de seu tempo e esforços para a condução da pesquisa no campo.

Obrigada Senhor pela oportunidade de ter realizado a pesquisa com a Embrapa Florestas. Te agradeço pela vida das pessoas que trabalharam no campo ou no laboratório comigo, Caco, Gabriela, Nádia, Osias, Pedro, Rafa, Tenório, Sr. Mário, Sr. Renato, Wilson. Obrigada por ter colocado pessoas dispostas a me ajudar. Foram momentos de trabalho intenso, mas também de muita alegria!

Paizinho, obrigada pela vida do meu noivo Ricardo! Através da vida dele eu pude sentir do teu amor e do teu cuidado Senhor. Obrigada por ter colocado uma pessoa para me dar apoio para a realização deste sonho, contribuição de tempo e intelecto para a escrita da tese e ainda força para continuar nos momentos de descrença.

Obrigada Senhor pela vida das minhas amigas Adri e Jana, que me conduzem para o caminho da vida em abundância e servem de ferramenta sua na minha vida!

Enfim Deus, te agradeço por ter feito deste período do doutorado único e cheio de mudanças, desafios e bênçãos! Obrigada por ter me capacitado para a redação desta tese, pois o teu poder se aperfeiçoa na minha fraqueza. Obrigada por ter me dado sonhos e futuras oportunidades!

Senhor, abençoa a vida das pessoas que me acompanham, daquelas que me ajudaram e daquelas que ainda estão me ajudando a chegar até aqui. Que elas possam sentir em seus corações a gratidão e o amor com que cada palavra foi escrita. Encha a vida delas da tua prosperidade.

Em nome de Jesus eu faço essa oração, Amém.

“Mas buscai primeiramente o Reino de Deus e a sua justiça, e todas estas coisas vos serão acrescentadas”.

Mateus 6:33

“Se me obedecerem, eu serei uma fonte de alegria para vocês e farei com que vençam todas as dificuldades; e vocês serão felizes na terra que eu dei ao seu antepassado Jacó. Eu, o Senhor, falei.”

Isaías 58:14

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele o fará”.

Salmos 37:5

“Bem-aventurada a que creu, pois há de cumprir-se coisas que da parte do Senhor lhe foram ditas”.

Lucas 1:45

Porque para Deus nada é impossível.

Lucas 1:37

RESUMO GERAL

O eucalipto é amplamente cultivado no Brasil, porém pouco se sabe sobre a dinâmica da emissão de óxido nitroso (N_2O) do solo submetido à adubação nitrogenada e das posições de solo no plantio. Os objetivos deste estudo foram avaliar (1) o potencial de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada (FNEA) em mitigar a emissão de N_2O do solo cultivado com eucalipto (casa de vegetação e campo), (2) seu efeito sobre a emissão de metano (CH_4) do solo e eficiência de uso do nitrogênio da cultura (casa de vegetação), e (3) o efeito das posições no plantio sobre a emissão de N_2O do solo. O experimento de casa de vegetação foi conduzido com mudas de eucalipto em vasos contendo Latossolo Vermelho argiloso. Os tratamentos de FNEA consistiram em: Controle, ureia, ureia revestida com polímero, ureia com inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD), ureia com inibidor de urease (NBPT), ureia com inibidores de urease e nitrificação, sulfato de amônio, sulfato de amônio revestido com polímero e sulfato de amônio com inibidor de nitrificação. A avaliação do fluxo de N_2O e CH_4 do solo foi realizada pelo método de câmara estática fechada durante 162 dias. Ao final deste período, a eficiência de uso do nitrogênio das mudas foi avaliada. O experimento de campo foi conduzido em plantio de eucalipto sob Latossolo Vermelho argiloso. O experimento seguiu delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas. O fator primário consistiu em fontes nitrogenadas ureia e sulfato de amônio individuais e combinadas ao inibidor de nitrificação DCD, bem como o solo sem adubação nitrogenada. O fator secundário consistiu em posições de solo no plantio, sendo solo adubado, solo da linha e da entrelinha de plantio. A avaliação do fluxo de N_2O do solo foi realizada pelo método de câmara estática fechada durante dois anos. As conclusões foram que, em casa de vegetação, a adubação com fontes convencionais ureia ou sulfato de amônio com o inibidor de nitrificação DCD constituiu a melhor alternativa para mitigar a emissão de N_2O do solo, para atenuar o efeito inibitório ao consumo de CH_4 do solo e para aumentar a eficiência de uso do nitrogênio pelas mudas de eucalipto. Contudo, os fertilizantes em polímeros e a combinação de NBPT e DCD à ureia não aumentaram a eficiência de uso do nitrogênio pelas plantas e não apresentaram potencial de mitigação da emissão de N_2O e CH_4 do solo. Nas condições de campo, a combinação do inibidor de nitrificação DCD às fontes ureia ou sulfato de amônio mitigou a emissão de N_2O do solo em relação às fontes convencionais, reduzindo em 54% a emissão do solo adubado e em 16% a emissão total do povoamento. O efeito das posições no plantio ocorreu somente no primeiro ano de cultivo do eucalipto, com maior emissão de N_2O no solo adubado, seguido da linha e da entrelinha de plantio.

Palavras-chave: Florestas plantadas. Gases de efeito estufa. Adubação nitrogenada. FNEA. Manejo do solo.

GENERAL ABSTRACT

Eucalyptus is widely cultivated in Brazil, but little is known about the dynamics of nitrous oxide (N_2O) emission from soil under nitrogen fertilization and the soil positions at planting. The aims of this study were to evaluate (1) the potential of enhanced efficiency nitrogen fertilizers (EENF) in mitigate N_2O emission from soil cultivated with eucalyptus (greenhouse and field), (2) its effect on soil methane (CH_4) emission and nitrogen use efficiency by plants (greenhouse), and (3) the effect of planting positions on soil N_2O emission. The greenhouse experiment was carried out with eucalyptus seedlings in pots containing clayey Oxisol. The EENF treatments consisted of: Control, urea, polymer-coated urea, urea with dicyandiamide nitrification inhibitor (DCD), urea with urease inhibitor (NBPT), urea with urease and nitrification inhibitors, ammonium sulfate, ammonium sulfate coated with polymer and ammonium sulfate with nitrification inhibitor. The evaluation of soil N_2O and CH_4 fluxes was carried out by the closed static chamber method for 162 days. At the end of this period, nitrogen use efficiency of the seedlings was evaluated. The field experiment was conducted in an eucalyptus plantation under a clayey Oxisol. The experiment followed a randomized block design with subdivided plots. The primary factor was individual nitrogen sources urea and ammonium sulphate combined with nitrification inhibitor DCD, as well as the soil without nitrogen fertilization. The secondary factor was soil positions at planting, being fertilized soil, plant row soil and plant inter-row soil. The evaluation of soil N_2O flux was carried out by the closed static chamber method for two years. The conclusions were that, in the greenhouse, fertilization with conventional sources urea or ammonium sulfate with the nitrification inhibitor DCD was the best alternative to mitigate soil N_2O emission, to mitigate the inhibitory effect on the soil CH_4 uptake and to increase the nitrogen use efficiency by eucalyptus seedlings. However, polymer fertilizers and NBPT and DCD with urea did not increase the efficiency of nitrogen use by plants and did not show potential for mitigating soil N_2O and CH_4 emissions. Under field conditions, the DCD nitrification inhibitor with urea or ammonium sulphate sources mitigated soil N_2O emission in relation to conventional sources, reducing the fertilized soil emission by 54% and total stand emission by 16%. The effect of the planting positions occurred only in the first year of eucalyptus cultivation, with higher N_2O emission in fertilized soil, followed by the plant row and plant inter-row.

Keywords: Planted forests. Greenhouse gases. Nitrogen fertilization. EENF. Soil management.

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL..... | 10 |
| 1.1 | REFERÊNCIAS..... | 12 |
| 2 | CAPÍTULO I - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO E EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO DO EUCALIPTO ADUBADO COM FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA..... | 14 |
| 2.1 | RESUMO..... | 14 |
| 2.2 | ABSTRACT..... | 15 |
| 2.3 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2.4 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 18 |
| 2.4.1 | Experimento..... | 18 |
| 2.4.2 | Avaliação da emissão de N ₂ O e CH ₄ do solo..... | 21 |
| 2.4.3 | Atributos do solo e temperatura do ar..... | 23 |
| 2.4.4 | Atributos da planta..... | 24 |
| 2.4.5 | Análise estatística..... | 24 |
| 2.5 | RESULTADOS..... | 25 |
| 2.5.1 | Emissão de N ₂ O e CH ₄ do solo..... | 25 |
| 2.5.2 | Atributos do ambiente e do solo..... | 29 |
| 2.5.3 | Correlação entre fluxos de N ₂ O e CH ₄ e as variáveis do solo | 33 |
| 2.5.4 | Atributos da planta..... | 34 |
| 2.6 | DISCUSSÃO..... | 37 |
| 2.6.1 | Fonte nitrogenada: ureia vs. sulfato de amônio..... | 37 |
| 2.6.2 | Efeito dos polímeros e do inibidor de nitrificação..... | 40 |
| 2.6.3 | Inibidor de urease vs. inibidor de urease e nitrificação..... | 42 |
| 2.7 | CONCLUSÕES..... | 43 |
| 2.8 | REFERÊNCIAS..... | 44 |
| 3 | CAPÍTULO II - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO: EFEITO DO INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO COMBINADO À ADUBAÇÃO NITROGENADA E DAS POSIÇÕES DO POVOAMENTO | 52 |
| 3.1 | RESUMO..... | 52 |
| 3.2 | ABSTRACT..... | 53 |
| 3.3 | INTRODUÇÃO..... | 54 |
| 3.4 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 56 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.4.1 | Experimento..... | 56 |
| 3.4.2 | Avaliação da emissão de N ₂ O do solo..... | 59 |
| 3.4.3 | Atributos climáticos e do solo..... | 62 |
| 3.4.4 | Análise estatística..... | 62 |
| 3.5 | RESULTADOS..... | 63 |
| 3.5.1 | Emissão de N ₂ O do solo..... | 63 |
| 3.5.2 | Atributos climáticos e do solo..... | 70 |
| 3.5.3 | Correlação entre fluxos de N ₂ O e as variáveis do solo | 77 |
| 3.6 | DISCUSSÃO..... | 79 |
| 3.6.1 | Adubação nitrogenada: fontes convencionais vs. inibidor de nitrificação... 79 | |
| 3.6.2 | Efeito das posições no plantio..... | 81 |
| 3.7 | CONCLUSÕES..... | 83 |
| 3.8 | REFERÊNCIAS..... | 83 |
| 4 | CONCLUSÃO GERAL..... | 90 |
| 5 | REFERÊNCIAS..... | 91 |
| | APÊNDICE 1 – FLUXOS DE N₂O E CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO I..... | 104 |
| | APÊNDICE 2 – PPA E pH_{CaCl2} DO SOLO DO CAPÍTULO I..... | 107 |
| | APÊNDICE 3 – CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIO E NITRATO DO SOLO DO | |
| | CAPÍTULO I..... | 110 |
| | APÊNDICE 4 – ALTURA E DIÂMETRO DO COLO DAS MUDAS DE | |
| | EUCALIPTO DO CAPÍTULO I..... | 113 |
| | APÊNDICE 5 – VOLUME DO CAULE DAS MUDAS DE EUCALIPTO DO | |
| | CAPÍTULO I..... | 114 |
| | APÊNDICE 6 – FLUXOS DE CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO II..... | 115 |
| | APÊNDICE 7 – EMISSÃO ACUMULADA DE CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO | |
| | II..... | 116 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas plantadas possuem potencial em sequestrar carbono na biomassa (FAO, 2015), consumir metano no solo, bem como emitir menos óxido nitroso (N_2O) que outros sistemas de uso da terra (LIVESLEY et al., 2009). No Brasil, solos cultivados com pinus (VELOSO et al., 2019) e eucalipto (CUER et al., 2018) tem apresentado emissão de N_2O semelhante a floresta nativa de referência, contudo, pouco se sabe sobre a dinâmica de emissão de N_2O no período inicial de cultivo, quando a adubação nitrogenada é realizada. Estudos em solos florestais relatam que a emissão de N_2O do solo adubado com nitrogênio pode ser de duas (SHRESTHA et al., 2014) a oito vezes maior que o solo não adubado (WANG et al., 2014). Isso porque a adição de elevada quantidade de nitrogênio ao solo em curto período de tempo aumenta as concentrações de amônio e nitrato no solo, constituindo substratos para intensificar os processos de nitrificação e desnitrificação, e consequente emissão de N_2O (GREGORICH et al., 2015).

Em termos quantitativos de emissão de N_2O pela adubação nitrogenada, o Painel intergovernamental de mudanças climáticas estabeleceu o fator de emissão padrão da ureia de 1% (IPCC, 2006), que corresponde a quantidade de nitrogênio perdida na forma de N_2O . Embora esse valor pareça baixo, a emissão em $N-N_2O$ pode atingir magnitude quatro vezes maior quando expressa em dióxido de carbono (CO_2) equivalente, pois o potencial de aquecimento global do N_2O é de 298 vezes maior que o CO_2 (IPCC, 2013). Esse potencial de emissão de N_2O pela adubação nitrogenada torna-se motivo de preocupação no setor florestal, visto que a área com cultivo de eucalipto vem aumentando cerca de 126.700 hectares ano^{-1} nos últimos 10 anos (IBÁ, 2019), implicando em aumento da demanda por adubo nitrogenado e consequente emissão de N_2O para a atmosfera. Estima-se que 9.500 toneladas de nitrogênio são necessárias anualmente para atender o aumento de tal área, considerando a dose média recomendada para a cultura de 75 kg N ha^{-1} (PAULETTI e MOTTA, 2019).

Neste sentido, uma alternativa para a mitigação desta fonte de emissão de N_2O é a utilização de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada (FNEA). Os FNEA possuem tecnologia para aumentar a eficiência de uso do

nitrogênio pelas plantas (CHIEN et al., 2009), e seus efeitos se estendem à mitigação da emissão de N_2O do solo, devido a diminuição da disponibilidade de substrato nitrogenado para a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (AKIYAMA et al., 2010). Entre os principais FNEA estão os fertilizantes de liberação controlada e os estabilizados. Os fertilizantes de liberação controlada possuem os grânulos revestidos por polímeros orgânicos ou inorgânicos, que atuam como barreira física e promovem liberação lenta e gradual de nitrogênio no solo (TRENKEL, 2010). Os fertilizantes estabilizados possuem inibidores químicos em sua composição, e entre os mais utilizados estão N-(n-butil) tiosfosfórico triamida (NBPT) e dicianodiamida (DCD) (TRENKEL, 2010). O NBPT atua inibindo o sítio ativo da enzima urease, responsável pela hidrólise da ureia retardando a taxa de amonificação no solo (FORRESTAL et al., 2016); enquanto DCD inibe a enzima amônia monooxigenase, responsável pelo processo de nitrificação (DI e CAMERON, 2002).

Os FNEA têm mitigado a emissão de N_2O de solos agrícolas (ZANATTA et al., 2010; TIAN et al., 2015; RIBEIRO et al., 2020), porém, pouco se sabe sobre o efeito destes produtos na emissão de N_2O de solos cultivados com eucalipto, cujo preparo é realizado a cada cinco a sete anos e adubação de forma localizada nos primeiros meses de cultivo (WILCKEN et al., 2008). Além da adubação nitrogenada, o manejo florestal do solo também pode influenciar a emissão de N_2O . Em áreas com cultivo sucessivo de eucalipto, o preparo do solo é realizado por subsolagem na linha de plantio e os resíduos da colheita da rotação anterior são amontoados na entrelinha. As mudas são plantadas e as adubações de base e cobertura são realizadas em seus devidos períodos (WILCKEN et al., 2008).

As operações florestais realizadas criam três condições de solo, ocorrendo nas posições de i) solo adubado: foi subsolado e adubado e possui influência da planta; ii) solo da linha: submetido apenas à subsolagem, e iii) solo da entrelinha: sem revolvimento, mas submetido ao tráfego de máquinas para as operações de colheita da rotação anterior e preparo da linha de plantio atual; que possivelmente influenciam a dinâmica de emissão de N_2O , bem como

contribuem de forma diferenciada para a emissão total do povoamento. A adubação nitrogenada pode intensificar a ocorrência dos processos de emissão de N₂O no solo adubado (CAMERON et al., 2013), enquanto que a subsolagem pode estimular a emissão de N₂O pelo aumento da taxa de mineralização do nitrogênio no solo da linha (CARTER et al., 2002). Já a emissão de N₂O do solo da entrelinha de plantio pode ser predominante decorrente do processo de desnitrificação devido à compactação do solo pelo tráfego de máquinas pesadas (TEEPE et al., 2002).

Neste sentido, considerando que a avaliação da emissão de N₂O do solo decorrente da adubação nitrogenada do eucalipto e nas posições no plantio torna-se necessária para estabelecer alternativas de mitigação desta fonte de emissão, este estudo tem como objetivo avaliar (1) o potencial de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada em mitigar a emissão de N₂O do solo cultivado com eucalipto (casa de vegetação e campo), (2) seu efeito sobre a emissão de CH₄ do solo e eficiência de uso do nitrogênio da cultura (casa de vegetação), e (3) o efeito das posições no plantio sobre a emissão de N₂O do solo.

1.1 REFERÊNCIAS

AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O e NO emissions from agricultural soil: meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1837-1846, 2010.

CAMERON, K. C.; DI, H. J.; MOIR, J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, p. 145–173, 2013.

CARTER, M. C.; DEAN, T. J.; ZHOU, M.; MESSINA, M. G.; WANG, Z. Short-term changes in soil C, N, and biota following harvesting and regeneration of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Forest Ecology and Management**, v. 164, p. 67-88, 2002.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 120, p. 267-322, 2009.

CUER, C. A.; RODRIGUES, R. A. R.; BAILIEIRO, F. C.; JESUS, J.; SILVA, E. P.; ALVES, B. J. R.; RACHID, C. T. C. C. Short-term effect of *Eucalyptus* plantations on soil microbial communities and soil atmosphere methane and nitrous oxide exchange. **Scientific Reports**. v. 8, p. 1-12, 2018.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. The use of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), to decrease nitrate leaching and nitrous oxide emissions in a simulated grazed and irrigated grassland. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 395-403, 2002.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). International online conference on the economics of climate change mitigation options in the forest sector: summary report. Rome: FAO, 2015.

FORRESTAL, P. J.; HARTY, M.; CAROLAN, R.; LANIGAN, G. J.; WATSON, C. J.; LAUGHLIN, R. J.; MCNEILL, G.; CHAMBERS, B. J.; RICHARDS, K. G. Ammonia emissions from urea, stabilized urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss abatement in temperate grassland. **Soil Use and Management**, v. 32, p. 92–100, 2016.

GREGORICH, E.; JANZEN, H. H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soil and greenhouse gas effects. **Advances in Agronomy**, v. 132, p. 39-74, 2015.

IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). Relatório 2019. IBÁ, 2019.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate Change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (editors). Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, p. 1-1535.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). N₂O emissions from managed soil, and CO₂ emissions from lime and urea application. In:

EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (editors). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

LIVESLEY, S. J.; KIESE, R.; MIEHLE, P.; WESTON, C. J.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ARNDT, S. K. Soil-atmosphere Exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. **Global Change Biology**, v. 15, p. 425-440, 2009.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019.

RIBEIRO, R. H.; BESEN, M. R.; SIMON, P. L.; BAYER, C.; PIVA, J. T. Enhanced-efficiency nitrogen fertilisers reduce winter losses of nitrous oxide, but not of ammonia, from no-till soil in a subtropical agroecosystem. **Soil Use and Management**, 2020.

SHRESTHA, R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B.; HOLUB, S. M.; MEEHAN, N. Fertilizer management, parent material, and stand age influence forest soil greenhouse gas fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 2041-2053, 2014.

TEEPE, R.; BRUMME, R.; BEESE, F.; LUDWIG, B. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 605-611, 2002.

TIAN, Z.; WANG, J. J.; LIU, S.; ZHANG, Z.; DODLA, S. K.; MYERS, G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of the Total Environment**, v. 533, p. 329-338, 2015.

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide. **Annals of Forest Science**, v. 76, 2019.

WANG, Y.; CHENG, S.; FANG, H.; YU, G.; XU, M.; DANG, X.; LI, L.; WANG, L. Simulated nitrogen deposition reduces CH₄ uptake and increases N₂O emission from a Subtropical plantation forest soil in Southern China. **Plos One**, v. 9, p. 1-10, 2014.

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FERREIRA FILHO, P. J.; POGETTO, M. H. F. A. D. Guia prático de manejo de plantações de eucalipto. Botucatu: FEPAF, 2008.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. S.; CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. 1. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

2 CAPÍTULO I - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO E EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO EM EUCALIPTO ADUBADO COM FERTILIZANTES NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA

2.1 RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada (FNEA) em reduzir a emissão de óxido nitroso (N_2O) do solo cultivado com eucalipto, bem como avaliar seu efeito sobre a emissão de metano (CH_4) do solo e a eficiência de uso do nitrogênio pelo eucalipto. O experimento foi realizado em casa de vegetação, com mudas de eucalipto em vasos contendo Latossolo Vermelho distrófico argiloso. Os tratamentos de FNEA consistiram em: Controle, ureia (U), ureia revestida com polímero (U-P), ureia com inibidor de nitrificação dicianodiamida (U-DCD), ureia com inibidor de urease (U-NBPT), ureia com inibidores de urease e nitrificação (U-NBPT-DCD), sulfato de amônio (SA), sulfato de amônio revestido com polímero (SA-P) e sulfato de amônio com inibidor de nitrificação (SA-DCD). A avaliação do fluxo de N_2O e CH_4 do solo foi realizada pelo método de câmara estática fechada durante 162 dias. Ao final deste período, a eficiência de uso do nitrogênio (EUN) das mudas foi avaliada. A ureia apresentou emissão de N_2O do solo 84% maior que sulfato de amônio ($630,5 \text{ mg N m}^{-2}$), enquanto que U-P, SA-P, U-NBPT mantiveram emissões semelhantes às suas respectivas fontes convencionais (U e SA). U-DCD e SA-DCD diminuíram a emissão de N_2O do solo em mais 95% em relação à U ($1066,6 \text{ mg N m}^{-2}$) e SA. A adubação nitrogenada na forma de U-P, SA-P, U-NBPT e U-NBPT-DCD diminuiu o consumo de CH_4 do solo em 30% em relação ao Controle ($-49,6 \text{ mg C m}^{-2}$). Porém, o consumo de CH_4 do solo em U-DCD e SA-DCD foi 12% maior que U e SA (média de $-34,6 \text{ mg C m}^{-2}$). As mudas adubadas com U-DCD, SA e SA-DCD apresentaram os maiores valores de EUN, variando de 5,2 a 11,5%, enquanto que as plantas cultivadas nos demais tratamentos apresentaram EUN média de 1,5%. De modo geral, a adubação com as fontes convencionais ureia e sulfato de amônio combinadas ao inibidor de nitrificação dicianodiamida constitui a melhor alternativa para mitigar a emissão de N_2O do solo, para atenuar o efeito inibitório do N fertilizante sobre o consumo de CH_4 do solo e para aumentar a eficiência de uso do nitrogênio pelas mudas de eucalipto.

Palavras-chave: Floresta plantada. Gases de efeito estufa. Absorção de nitrogênio. NBPT e DCD. Fertilizantes nitrogenados em polímeros.

2.2 ABSTRACT

The study aimed to evaluate the potential of enhanced efficiency nitrogen fertilizers (EENF) to reduce nitrous oxide (N_2O) emission from soil cultivated with eucalyptus, as well as to evaluate its effect on soil methane (CH_4) emission and nitrogen use efficiency by eucalyptus. The experiment was carried out in a greenhouse, with eucalyptus seedlings in pots containing clayey Oxisol. The EENF treatments consisted of: Control, urea (U), polymer coated urea (U-P), urea with dicyandiamide nitrification inhibitor (U-DCD), urea with urease inhibitor (U-NBPT), urea with urease and nitrification inhibitors (U-NBPT-DCD), ammonium sulfate (AS), polymer-coated ammonium sulfate (AS-P) and ammonium sulfate with nitrification inhibitor (AS-DCD). Soil N_2O and CH_4 fluxes were evaluated by closed static chamber method for 162 days. At the end of this period, seedlings nitrogen use efficiency (NUE) was evaluated. Urea presented soil N_2O emission 84% higher than ammonium sulfate ($630.5 \text{ mg N m}^{-2}$), while U-P, AS-P, U-NBPT maintained emissions like their respective conventional sources (U and AS). U-DCD and AS-DCD decreased soil N_2O emission by more than 95% compared to U ($1066.6 \text{ mg N m}^{-2}$) and AS. Nitrogen fertilization as U-P, AS-P, U-NBPT and U-NBPT-DCD decreased soil CH_4 uptake in 30% in relation to Control ($-49,6 \text{ mg C m}^{-2}$). However, soil CH_4 uptake in U-DCD and AS-DCD was 12% higher than U and AS (average of $-34,6 \text{ mg C m}^{-2}$). Seedlings fertilized with U-DCD, AS and AS-DCD presented the highest NUE values, varying from 5.2 to 11.5%, while plants cultivated in other treatments showed an average of 1.5%. In general, fertilization with conventional sources urea and ammonium sulfate combined with the nitrification inhibitor dicyandiamide constitutes the best alternative to mitigate soil N_2O emission, to mitigate the inhibitory effect of N fertilizer on the soil CH_4 uptake and to increase the nitrogen use efficiency by eucalyptus seedlings.

Keywords: Planted forest. Greenhouse gases. Nitrogen uptake. NBPT and DCD. Coated nitrogen fertilizers.

2.3 INTRODUÇÃO

A adubação nitrogenada é amplamente realizada para garantir a produtividade das culturas, no entanto, possui efeito direto e indireto sobre a emissão dos gases de efeito estufa do solo (IPCC, 2013). A adição de elevada quantidade de nitrogênio ao solo em curto período de tempo pode estimular o metabolismo dos microrganismos decompositores e a emissão de dióxido de carbono (MOJEREMANE et al., 2012), inibir a oxidação de metano (CH₄) (ZANATTA et al., 2010) e disponibilizar substrato para a produção de óxido nitroso (N₂O) (WANG et al., 2014). A maior influência da fertilização nitrogenada é observada na emissão de N₂O, devido ao aumento das concentrações de amônio e nitrato no solo, que constituem substratos para os processos microbianos de nitrificação e desnitrificação, respectivamente (GREGORICH et al., 2015).

Estudos realizados em solos florestais relatam que a emissão de N₂O do solo adubado com nitrogênio pode atingir magnitudes de duas (SHRESTHA et al., 2014) a oito vezes maior que o solo não adubado (WANG et al., 2014). Neste sentido, uma alternativa para diminuir a magnitude de emissão de N₂O de solos florestais adubados com nitrogênio seria a utilização de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada (FNEA), que possuem tecnologia para aumentar a eficiência de uso do nitrogênio pelas plantas, bem como reduzir suas perdas (CHIEN et al., 2009). Os FNEA podem ser de liberação controlada ou estabilizados.

Entre os fertilizantes de liberação controlada, há aqueles em que o grânulo do fertilizante é revestido por polímeros hidrofóbicos, de composição orgânica ou inorgânica (como resinas, minerais etc.) (TRENKEL, 2010). Seu mecanismo de liberação de nitrogênio no solo consiste na entrada de água pelos microporos do polímero, aumento da pressão osmótica dentro do núcleo, distensão do revestimento e liberação do nitrogênio por difusão, ocorrendo de forma lenta em um período mais longo (TRENKEL, 2010). Desta forma, o lento suprimento de nitrogênio às plantas diminui a probabilidade de perdas por volatilização, emissão de N₂O e/ou lixiviação de nitrato (NAZ e SULAIMAN, 2016). Contudo, sua eficiência em diminuir a emissão de N₂O do solo é variável (AKIYAMA et al., 2010) e está diretamente relacionada à qualidade do revestimento (CHRISTIANSON, 1988) e às condições do solo que regulam sua degradação (GOLDEN et al., 2011).

Os fertilizantes estabilizados são constituídos pela adição de inibidores de urease e/ou nitrificação aos fertilizantes convencionais durante sua produção. Os

inibidores mais utilizados são as moléculas N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) e dicianodiamida (DCD) (TRENKEL, 2010). O NBPT atua inibindo o sítio ativo da enzima urease, retardando a hidrólise da ureia e diminuindo a disponibilidade de substrato para a ocorrência dos processos de amonificação, (FORRESTAL et al., 2016), nitrificação e desnitrificação. Embora Akiyama et al. (2010) em meta-análise tenham observado ausência de efeito do NBPT em diminuir a emissão de N₂O de solos agrícolas, alguns estudos relatam mitigações consideráveis (ZANATTA et al., 2010; LIU et al., 2017; RIBEIRO et al., 2020).

O DCD atua inibindo o sítio ativo da enzima amônia monooxigenase, responsável pelo processo da oxidação de amônio. Assim, maior concentração de nitrogênio na forma de amônio permanece no solo por mais tempo, aumentando o aproveitamento pelas plantas (DING et al., 2015) e diminuindo as perdas de nitrogênio por emissão de N₂O, N₂ ou lixiviação de nitrato (GILSANZ et al., 2016). Por atuar diretamente no processo de nitrificação, os fertilizantes com DCD são relatados com maior eficiência entre os FNEA citados (AKIYAMA et al., 2010). Já a utilização conjunta de DCD com NBPT promove maior mitigação da emissão de N₂O do solo (ROCHE et al., 2016), bem como quando comparado à fertilizantes em polímeros (LIU et al., 2017).

Estudos desenvolvidos com FNEA em solos agrícolas relatam diminuição da volatilização de amônia (TIAN et al., 2015; PAN et al., 2016) e da emissão de N₂O (HALVORSON et al., 2014; RIBEIRO et al., 2020) e aumento da eficiência de uso do nitrogênio pelas culturas (SINGH et al., 2013; YANG et al., 2016). Contudo, pouco se sabe sobre o efeito destes produtos sobre a emissão de N₂O de solos florestais, que são manejados apenas nas ocasiões de plantio e colheita do povoamento, práticas que são realizadas a cada cinco ou sete anos, dependendo do ciclo da floresta. Além disso, a adubação nitrogenada é realizada de forma localizada próximo das mudas e até nove meses após seu plantio (WILCKEN et al., 2008).

O efeito dos FNEA sobre a emissão de CH₄ do solo é ainda menos conhecido. Estudos relatam que a adubação nitrogenada apresenta efeito variável sobre o fluxo de CH₄ (BODELIER e LAANBROEK, 2004), podendo inibir (ZHANG et al., 2017), não alterar ou aumentar (GENG et al., 2017) sua oxidação pelo solo. O comportamento normalmente está relacionado à dose de nitrogênio aplicada, sendo que doses baixas podem diminuir a competição de nitrogênio e estimular a atividades das bactérias metanotróficas, e doses elevadas podem inibir seu metabolismo (PENG et al., 2019).

Já a lenta liberação de nitrogênio no solo e sua presença por mais tempo pela adubação com FNEA pode inibir a atividade metanotrófica do solo (ZANATTA et al., 2010), ocorrendo pelo efeito inibitório do amônio (BODELIER e LAANBROEK, 2004), pela produção de compostos intermediários durante a nitrificação (hidroxilamina e nitrito) e desnitrificação (nitrito) (WANG e INESON, 2003), e/ou pela presença de nitrato (MOCHIZUKI et al., 2012).

O efeito dos FNEA também é pouco conhecido sobre a eficiência de uso do nitrogênio do eucalipto. A adubação nitrogenada na cultura é realizada em doses baixas, ocorrendo ausência ou baixo efeito sobre o crescimento das mudas (FERREIRA e STAPE, 2009; BASSACO et al., 2018). A baixa resposta ao nitrogênio aplicado pode ser atribuído à capacidade do solo em suprir a demanda do nutriente (GONÇALVES et al., 2004). Contudo, a lenta liberação de nitrogênio no solo pelos FNEA pode aumentar a eficiência de uso do nitrogênio do eucalipto, assim como observado por Raymond et al. (2016) em plantio de pinus adubado com ureia com NBPT.

O cultivo do eucalipto abrange 73% da área de florestas plantadas no Brasil e a taxa de expansão vem aumentando cerca de 126.700 hectares ano⁻¹ nos últimos 10 anos (IBÁ, 2019). A dose média de nitrogênio recomendada para a cultura é de 75 kg ha⁻¹ (PAULETTI e MOTTA, 2019), e extrapolando essa dose para as novas áreas implantadas, estima-se que 9.500 toneladas de nitrogênio são necessárias anualmente. Em termos de emissão de gases de efeito estufa, estima-se que 95 toneladas de N-N₂O e 44.500 toneladas CO₂ podem ser emitidos para a atmosfera com a implantação de novas áreas, considerando fator de emissão de N₂O de 1% (IPCC, 2006) e potencial de aquecimento global do N₂O de 298 (IPCC, 2013), respectivamente. Neste sentido, com base no potencial de emissão de N₂O que a adubação nitrogenada do eucalipto pode promover, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada em mitigar a emissão de N₂O do solo cultivado com eucalipto, bem como seu efeito sobre a emissão de CH₄ do solo e eficiência de uso do nitrogênio da cultura.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação, durante 162 dias, entre junho e dezembro de 2017. O solo utilizado foi coletado na Fazenda Experimental Canguiri (25°23'42" S e 49°07'30" W), no município de Pinhais – PR, e foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (SUGAMOSTO, 2002). O solo estava sendo utilizado para uso agrícola e suas características químicas e físicas estão apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DO LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO TÍPICO COLETADO EM PINHAIS-PR E USADO NO EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO DESTE ESTUDO. EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Característica | Camada (cm) | | | | | | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0-5 | 5-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 |
| pH _{CaCl2} | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 4,8 | 4,6 | 4,5 |
| pH _{SMP} | 5,7 | 5,7 | 5,8 | 5,9 | 5,7 | 5,7 | 5,7 |
| Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,13 | 0,10 | 0,13 | 0,27 | 0,53 | 0,70 | 0,96 |
| H+Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 6,7 | 6,4 | 6,1 | 5,4 | 6,0 | 6,1 | 6,6 |
| Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 6,2 | 6,4 | 6,5 | 5,0 | 2,2 | 1,3 | 0,9 |
| Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 1,9 | 2,3 | 2,5 | 2,3 | 1,1 | 0,4 | 0,3 |
| K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,133 | 0,087 | 0,050 | 0,032 | 0,027 | 0,021 | 0,023 |
| SB (cmol _c dm ⁻³) | 8,2 | 8,8 | 9,1 | 7,4 | 3,3 | 1,7 | 1,1 |
| t (cmol _c dm ⁻³) | 15 | 15 | 15 | 13 | 9 | 8 | 8 |
| P (mg dm ⁻³) | 2,9 | 1,8 | 1,1 | 0,6 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| NT (%) | 0,25 | 0,25 | 0,21 | 0,17 | 0,12 | 0,12 | 0,10 |
| COT (%) | 3,9 | 3,8 | 3,4 | 3,0 | 2,2 | 1,9 | 1,7 |
| V (%) | 55 | 58 | 60 | 58 | 36 | 22 | 15 |
| m (%) | 1,6 | 1,1 | 1,4 | 3,5 | 13,8 | 29,7 | 45,6 |
| Areia (g kg ⁻¹) | 322 | 325 | 318 | 326 | 326 | 325 | 329 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 188 | 183 | 176 | 211 | 176 | 158 | 151 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 490 | 493 | 506 | 463 | 498 | 517 | 520 |
| DA (kg dm ⁻³) | 0,98 | 0,90 | 1,19 | 1,10 | 1,08 | 1,01 | 1,09 |
| DP (kg dm ⁻³) | 2,52 | nd | nd | nd | nd | nd | nd |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: NT, COT, DA, DP e nd significam nitrogênio total, carbono orgânico total, densidade aparente, densidade de partículas e não determinado, respectivamente.

O solo foi coletado nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm, que foram remontadas dentro de vasos plásticos com diâmetro de 60 cm e

capacidade de 250 L, na densidade de $0,9 \text{ kg dm}^{-3}$ até a camada 30-40 cm e de 1 kg dm^{-3} nas camadas 40-50 e 50-60 cm. A densidade do solo das camadas foi ajustada manualmente com base nos dados de área do vaso e espessura das camadas.

Dois conjuntos com 27 vasos foram montados, sendo um conjunto para avaliação da emissão de N_2O e CH_4 do solo, e outro para avaliação dos atributos do solo. Após montagem dos vasos, uma muda do híbrido *Eucalyptus urograndis* (I144) (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake) foi plantada em cada vaso.

Os tratamentos aplicados na adubação das mudas de eucalipto consistiram das fontes nitrogenadas ureia e sulfato de amônio combinadas com os seguintes aditivos para eficiência aumentada: (i) polímero de revestimento de grânulo, (ii) inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD), e (iii) inibidor de urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT); este último combinado somente com ureia. Nove combinações foram testadas:

1. **Controle**, sem aplicação de fertilizante nitrogenado;
2. **U**, ureia pura;
3. **U-P**, ureia revestida com polímero para liberação controlada de nitrogênio. Os grânulos foram revestidos por uma camada de enxofre elementar seguida de uma camada de polímeros orgânicos (produto comercial Polyblen);
4. **U-DCD**, ureia mais inibidor de nitrificação DCD (Sigma Aldrich®), misturado ao fertilizante no momento da adubação. A dose de DCD foi de 10% da dose de nitrogênio aplicado na forma de ureia, sendo definida através de consulta em trabalhos que o utilizam na adubação nitrogenada (VILSMEIER et al., 1987; BANERJEE et al., 2002; TIAN et al., 2015);
5. **U-NBPT**, ureia mais 5 g kg^{-1} de NBPT na composição final (produto comercial Super N);
6. **U-NBPT-DCD**, ureia mais $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ de NBPT e $5,5 \text{ g kg}^{-1}$ de DCD na composição final, sendo os inibidores originalmente na forma líquida e misturados aos grânulos para simular a composição de um produto comercial do mercado;
7. **SA**, sulfato de amônio puro;
8. **SA-P**, sulfato de amônio revestido com polímero para liberação controlada de nitrogênio. Os grânulos foram revestidos por uma camada de polímeros orgânicos seguida de uma camada de carbonato de cálcio (produto

comercial Sulfammo Meta 29, que também contém 7% de enxofre, 5% de cálcio e 2% de magnésio);

9. **SA-DCD**, sulfato de amônio mais inibidor de nitrificação DCD (Sigma Aldrich®), misturado ao fertilizante no momento da adubação. A dose de DCD correspondeu a 10% da dose de nitrogênio aplicado na forma de sulfato de amônio e foi definida através de consulta em trabalhos que o utilizam na adubação nitrogenada (VILSMEIER et al., 1987; BANERJEE et al., 2002; TIAN et al., 2015).

Os tratamentos foram dispostos no delineamento de blocos ao acaso com três repetições. A dose total de nitrogênio aplicada foi equivalente à $35,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ e dividida em duas aplicações. A aplicação de base foi realizada aos 15 dias após o plantio das mudas (DAP) e em dose equivalente à $13,6 \text{ kg N ha}^{-1}$, considerando a condição de um povoamento com a densidade de $1650 \text{ plantas ha}^{-1}$ que é usualmente empregada nas plantações paranaenses (espaçamento de $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$). Simulando a aplicação a campo, a dose de $8,24 \text{ g N vaso}^{-1}$ foi dividida e aplicada em duas covetas laterais distantes 10 cm da muda, numa profundidade de 10 cm. A aplicação de cobertura foi realizada aos 90 DAP, em dose equivalente à $21,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ e simulando a mesma condição de povoamento ($13,09 \text{ g N vaso}^{-1}$). A adubação de cobertura foi realizada em toda a superfície do vaso, simulando a aplicação a campo num raio de 30 cm da muda. Simultaneamente à adubação nitrogenada, também foi realizada adubação fosfatada e potássica nas doses correspondentes a $108 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na forma de superfosfato simples ($95 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na adubação de base e $13 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na adubação de cobertura) e $82,5 \text{ kg K}_2\text{O}$ na forma de cloreto de potássio ($15 \text{ kg K}_2\text{O}$ na adubação de base e $67,5 \text{ kg K}_2\text{O}$ na adubação de cobertura), respectivamente.

A umidade volumétrica do solo foi monitorada com o equipamento TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo, HydroSense, Campbell Scientific) cerca de três vezes por semana a uma profundidade de 20 cm. O monitoramento foi realizado a fim de manter a porosidade preenchida por água do solo (PPA) no intervalo de 40 a 60%.

2.4.2 Avaliação da emissão de N_2O e CH_4 do solo

A quantificação dos fluxos de N_2O e CH_4 ocorreu a partir de 15 dias após o plantio das mudas (DAP), imediatamente antes da adubação de base, e se estendeu até 177 DAP, totalizando 59 eventos de amostragem de ar (≈ 2 eventos por semana).

A amostragem foi realizada pelo método da câmara estática fechada (ZANATTA et al., 2014).

Em cada vaso, quatro bases de PVC (15 cm de diâmetro cada) foram inseridas no solo a 5 cm de profundidade, de modo que duas bases foram instaladas sobre as covetas que receberam fertilizante e duas no solo sem fertilizante de base. As câmaras de PVC (15 cm de diâmetro e 20 cm de altura) possuíam em sua parte superior conexão do tipo três vias para a coleta de ar e termômetro digital para monitoramento da temperatura interna. As câmaras foram acopladas nas canaletas localizadas na parte superior de cada base, que estavam previamente preenchidas com água para vedar as trocas gasosas.

Amostras de ar foram coletadas simultaneamente e conjuntamente nas quatro câmaras de cada vaso aos 0, 28 e 56 minutos após o fechamento das câmaras, e foram analisadas como uma amostra média das quatro câmaras pelo espectrômetro automático de cavidade do tipo ring-down (Picarro G2508, Santa Clara, CA, EUA). O espectrômetro é equipado com laser e detector com comprimento de onda infravermelho próximo, que quantifica as concentrações de N₂O e CH₄ através das características espectrais das moléculas em uma cavidade óptica. Os fluxos de N₂O e CH₄ (f, em µg N-N₂O m⁻² h⁻¹ ou µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹) foram calculados com base nas Equações 1 e 2:

$$V_{gás} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \times V \times \frac{1}{A} \right) \div 1.000.000.000 \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{P \times V_{gás}}{R \times T} \right) \times 28 \times 1.000.000 \times 60 \quad (2)$$

Sendo $V_{gás}$ o volume de N₂O ou CH₄ emitido (L m⁻² min⁻¹), $\Delta Q \Delta t^{-1}$ o coeficiente angular [calculado pela relação entre a concentração do gás no interior da câmara e tempo de amostragem ($\eta L \text{ min}^{-1}$)], V o volume total das quatro câmaras avaliadas em cada vaso (14,4 L), A a área total das quatro câmaras avaliada em cada vaso (0,071 m²), P a pressão atmosférica na câmara [0,906 atm para a altitude da área de estudo (950 m)], R a constante dos gases ideais (0,08206 atm L mol⁻¹ K⁻¹), T a temperatura média no interior da câmara durante o período de amostragem de ar (K).

O fluxo de N₂O por vaso em cada evento de amostragem no período entre as adubações de base e de cobertura foi ponderado considerando que a área das quatro

bases (0,071 m²), que incluía as duas covetas, representou 25% da área total de 0,2827 m² do vaso, e que o solo sem fertilizante representou 75% da área do vaso, desconsiderando qualquer movimento lateral de nitrogênio. Para essa proporção sem fertilizante, assumiu-se a taxa de emissão medida da parcela controle (também sem fertilizante). As emissões acumuladas de N₂O e CH₄ do período de avaliação (162 dias) foram estimadas pela integração dos fluxos diários. O fator de emissão do fertilizante nitrogenado (FE, em %) para cada fertilizante nitrogenado foi calculado pela seguinte equação:

$$FE = \frac{N-N_2O_{adubado} - N-N_2O_{controle}}{N_{aplicado}} \times 100 \quad (3)$$

Sendo N-N₂O_{adubado} a quantidade de nitrogênio emitida na forma de N₂O do vaso adubado (g N m⁻²), N-N₂O_{controle} a quantidade de nitrogênio emitida na forma de N₂O do vaso controle (g N m⁻²) e N_{aplicado} a quantidade total de nitrogênio aplicado no vaso via fertilizante (75,44 g N m⁻², ponderados a partir com base na dose total de 21,33 g N aplicados na área do vaso de 0,283 m²).

2.4.3 Atributos do solo e temperatura do ar

Em cada evento de amostragem de ar, a temperatura do solo da camada 0-10 cm foi monitorada com termômetro digital tipo espeto. Além disso, duas sub-amostras de solo da camada 0-5 cm foram coletadas com trado calador, constituindo uma amostra. A amostragem de solo foi realizada em local intermediário entre o solo da coveta e solo sem adubação no período pós adubação de base, e de forma aleatória no período pós adubação de cobertura.

As amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm. Uma sub-amostra de 10 g solo de solo foi utilizada para a determinação da umidade gravimétrica, através de secagem em estufa a 105 °C (EMBRAPA, 1997). Outra sub-amostra de 5 g de solo foi seca a 40 °C para a determinação do pH_{CaCl2} na proporção de 1:2,5 (EMBRAPA, 1997). E uma outra sub-amostra de 5 g de solo foi utilizada para a extração de amônio e nitrato com solução de KCl 2 mol L⁻¹. As concentrações de amônio e nitrato foram determinadas por espectrofotometria em sistema de análise por injeção em fluxo (FIA), pelo método do salicilato e da coluna de cádmio, respectivamente

(HAMBRIDGE, 2007 a,b). As intensidades de amônio e nitrato foram estimadas pela integração de suas concentrações diárias.

A PPA foi calculada com base nos dados de umidade gravimétrica, densidade aparente e densidade de partículas da camada 0-5 cm, sendo as duas últimas determinadas após a coleta de solo para sua caracterização química e física, anteriormente à coleta de solo a campo para montagem dos vasos (TABELA 1). A densidade aparente foi determinada com cilindro volumétricos de 98 cm³ (EMBRAPA, 1997), enquanto que a densidade de partículas foi determinada pelo método do álcool etílico (EMBRAPA, 1997).

A temperatura do ar foi monitorada durante o período de condução do estudo com estação meteorológica portátil (Hobo U12-011), instalada no interior da casa de vegetação.

2.4.4 Atributos da planta

As variáveis altura de planta e diâmetro do colo das mudas foram medidas mensalmente com régua e paquímetro digital, respectivamente, e o volume do caule das árvores foi calculado considerando a forma cilíndrica.

Ao final do período de avaliação (177 DAP), a parte aérea das plantas foi coletada e as raízes foram separadas do solo através de lavagem com jatos fracos de água. A parte aérea e raízes foram secas em estufa a 60 °C até obtenção de massa constante, e a massa seca foi determinada. A parte aérea foi separada em folhas e em caule mais galhos. As amostras de folhas, caule mais galhos e raízes foram moídas em moinho de facas até passagem em peneira de 2 mm de diâmetro. A amostra moída foi homogeneizada e uma sub-amostra foi utilizada para moagem em moinho almofariz automatizado até passagem em peneira de 250 µm. A concentração de nitrogênio dos tecidos de folhas, caule mais galhos e raízes foram determinados por combustão seca em analisador elementar Vario EL III.

O conteúdo de nitrogênio dos compartimentos folhas, caule mais galhos e raízes foi calculado pela multiplicação entre massa seca e concentração de nitrogênio. A massa seca total e conteúdo total de nitrogênio foram calculados pela soma dos valores de massa seca e conteúdo de nitrogênio dos compartimentos avaliados. A eficiência de uso do nitrogênio (EUN, em %) pela planta foi calculada conforme a seguinte equação:

$$EUN = \frac{N_{\text{adubado}} - N_{\text{controle}}}{N_{\text{aplicado}}} \times 100 \quad (4)$$

Sendo N_{adubado} o conteúdo total de nitrogênio na biomassa total da planta no vaso adubado (g N planta^{-1}), N_{controle} o conteúdo total de nitrogênio na biomassa total da planta do vaso controle (g N planta^{-1}) e N_{aplicado} a quantidade total de nitrogênio aplicado no vaso via fertilizante ($21,33 \text{ g N planta}^{-1}$);

2.4.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância (Bartlett), e quando necessário, eventos de amostragem foram transformados pela máxima potência de Box-Cox. Os dados foram então submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando delineamento experimental em blocos ao acaso com três repetições. As médias foram comparadas entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A correlação de Pearson foi realizada entre as variáveis temperatura, PPA, concentrações de amônio e nitrato e $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo sobre os fluxos de N_2O ou CH_4 dos períodos pós adubação de base e cobertura.

2.5 RESULTADOS

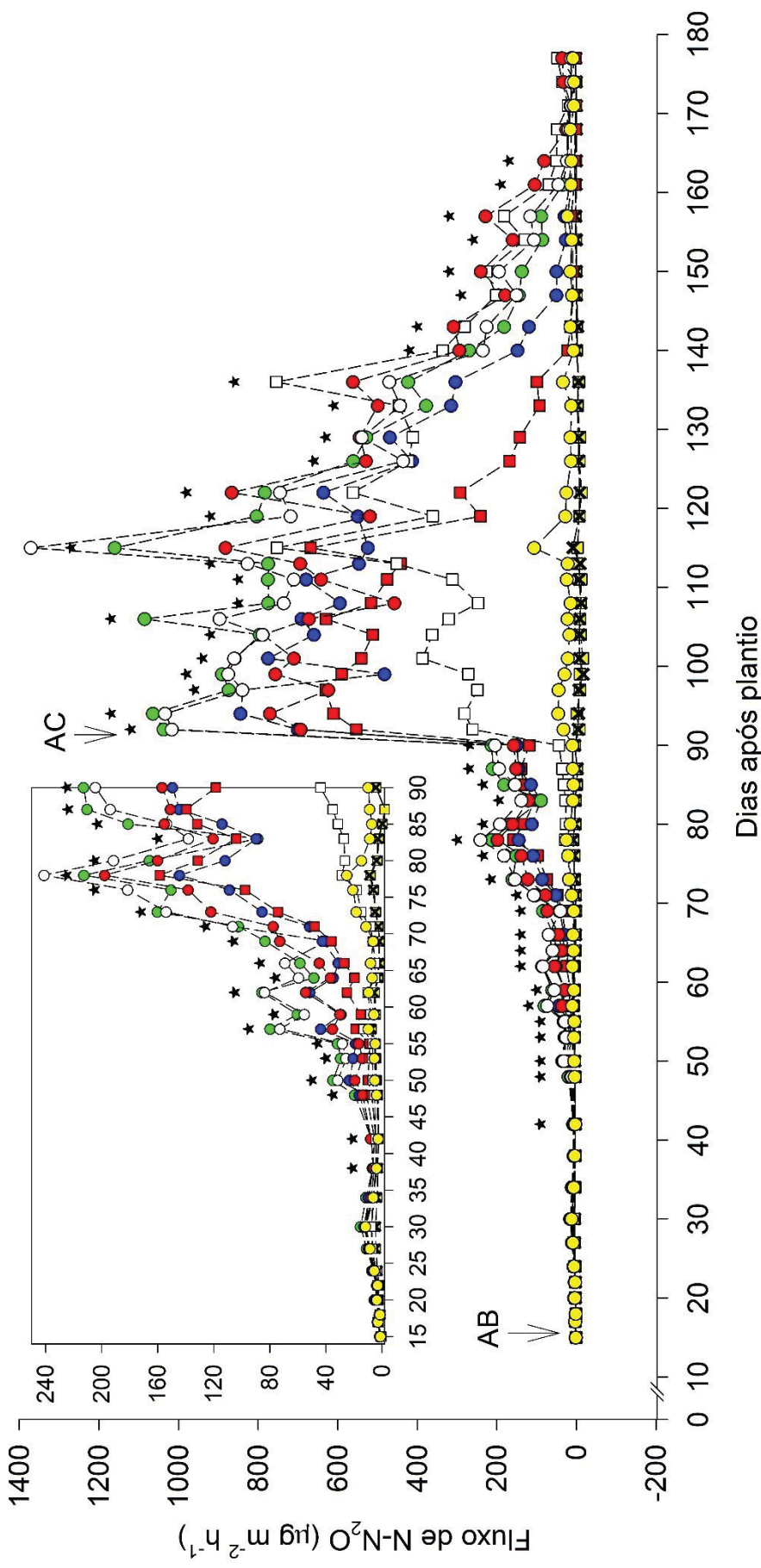
2.5.1 Emissão de N_2O e CH_4 do solo

Durante o período pós adubação de base, o fluxo de N_2O do solo (FIGURA 1) manteve-se abaixo de $10 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ até 50 DAP, aumentou gradativamente até ocorrência de pico aos 78 DAP, e permaneceu acima de $90 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ até 90 DAP. O fluxo de N_2O do solo aumentou em mais $400 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ após a adubação de cobertura aos 90 DAP, atingindo valor máximo aos 115 DAP ($1370 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Após este período, a emissão de N_2O diminuiu gradativamente, até ocorrência de fluxos basais da ordem de $14 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ após 168 DAP. De modo geral, os fluxos de N_2O do solo foram maiores em U, U-P, U-NBPT, U-NBPT-DCD em ambas adubações. O fluxo médio de N_2O destes tratamentos no período de maior emissão (50 a 157 DAP) foi cerca de $150 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ superior aos tratamentos SA e SA-P, e $350 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ maior que os tratamentos U-DCD e SA-DCD, que por sua vez, apresentaram fluxos próximos aos basais encontrados no Controle.

A emissão acumulada de N₂O do período total de avaliação variou de -1,9 a 1066,6 mg N m⁻² (TABELA 2). A adubação com ureia aumentou a emissão de N₂O do solo em 84% quando comparada com sulfato de amônio (1066,6 vs. 630,5 mg N m⁻²). Os fertilizantes com polímeros (U-P e SA-P) não diminuíram a emissão de N₂O de suas respectivas fontes convencionais ureia e sulfato de amônio. Por outro lado, os tratamentos com dicianodiamida (U-DCD e SA-DCD) mitigaram a emissão de N₂O de U e SA em mais de 95%, assemelhando-se ao Controle. A adição de NBPT à ureia não diminuiu a emissão de N₂O encontrada no solo adubado com a fonte convencional, contudo, a composição de NBPT mais dicianodiamida (U-NBPT-DCD) reduziu a emissão em 28% (de 1069,6 para 764,9 mg N m⁻²).

O fator de emissão de N₂O dos tratamentos avaliados (TABELA 2) seguiu o mesmo comportamento da emissão acumulada de N₂O. Os fatores de emissão em U e SA foram de 1,41 e 0,84%, respectivamente. Os fertilizantes com polímeros mantiveram esses valores, enquanto que os tratamentos U-DCD e SA-DCD reduziram o fator de emissão de N₂O para média de 0,04%. O tratamento U-NBPT manteve fator de emissão de N₂O semelhante à ureia (1,42%) e a adição de DCD (U-NBPT-DCD) o reduziu para 1,01%.

FIGURA 1 – FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO ENTRE 15 E 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO EM CASA DE VEGETAÇÃO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; as estrelas indicam diferença significativa entre pelo menos duas médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (teste de médias de cada evento de amostragem de ar consta no Apêndice 1).

TABELA 2 – EMISSÃO ACUMULADA DE ÓXIDO NITROSO E METANO E FATOR DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO ATÉ 177 DIAS DE CULTIVO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO EM CASA DE VEGETAÇÃO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Fonte de N e aditivo | Emissão acumulada de N-N ₂ O (mg m ⁻²) | Fator de emissão (%) | Emissão acumulada de C-CH ₄ (mg m ⁻²) |
|----------------------|---|----------------------|--|
| Controle | -0,5 c | 0,00 | -49,6 c |
| U | 1066,6 a | 1,41 a | -34,5 a |
| U-P | 969,7 a | 1,29 a | -35,0 a |
| U-DCD | 58,5 c | 0,08 c | -38,5 b |
| U-NBPT | 1069,6 a | 1,42 a | -34,8 a |
| U-NBPT-DCD | 764,9 b | 1,01 b | -35,6 a |
| SA | 630,5 b | 0,84 b | -34,8 a |
| SA-P | 516,0 b | 0,68 b | -37,5 b |
| SA-DCD | -1,9 c | 0,00 c | -41,7 b |

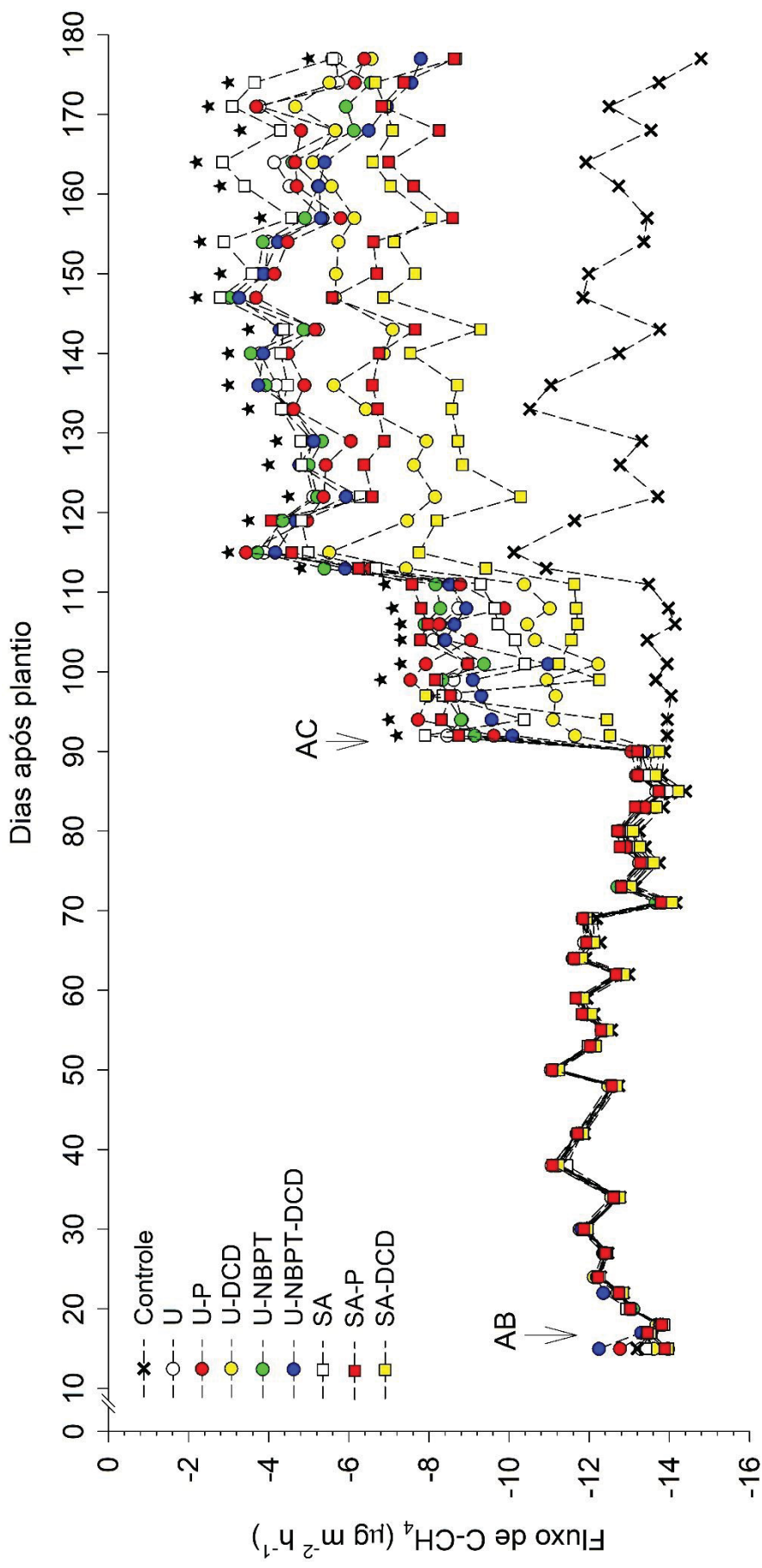
FONTE: A autora (2020).

NOTA: médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Os fluxos de CH₄ do solo foram todos negativos (FIGURA 2). Os influxos de CH₄ variaram de -15 a -11 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ e não apresentaram diferença entre os tratamentos após a adubação de base. Por outro lado, maiores amplitudes de consumo foram observadas no período após a adubação de cobertura (-2 a -15 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹). Neste período, a adubação nitrogenada reduziu significativamente o consumo de CH₄ do solo em relação ao Controle, sendo 30% menor nos tratamentos U, U-P, U-NBPT, U-NBPT-DCD e SA, e intermediárias em U-DCD, SA-P e SA-DCD (21%).

A emissão acumulada de CH₄ do período total de avaliação variou de -34,5 a -49,6 mg C m⁻² (TABELA 2). As fontes U e SA apresentaram consumo de CH₄ semelhante (média de -34,6 mg C m⁻²) e 30% menor que o solo não adubado (Controle). De modo geral, a adubação com fertilizantes em polímeros não apresentou diferença de consumo de CH₄ em relação às fontes convencionais (U e SA), enquanto que as fontes com inibidor de nitrificação (U-DCD e SA-DCD) apresentaram consumo de CH₄ semelhante entre si (média de -40,1 mg C m⁻²) e 12% superior às fontes convencionais. Os tratamentos U-NBPT e U-NBPT-DCD mantiveram consumos semelhantes a U.

FIGURA 2 – FLUXOS DE METANO ENTRE 15 E 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE EUCALIPTO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO EM CASA DE VEGETAÇÃO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; as estrelas indicam diferença significativa entre pelo menos duas médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (teste de médias de cada evento de amostragem de ar consta no Apêndice 1).

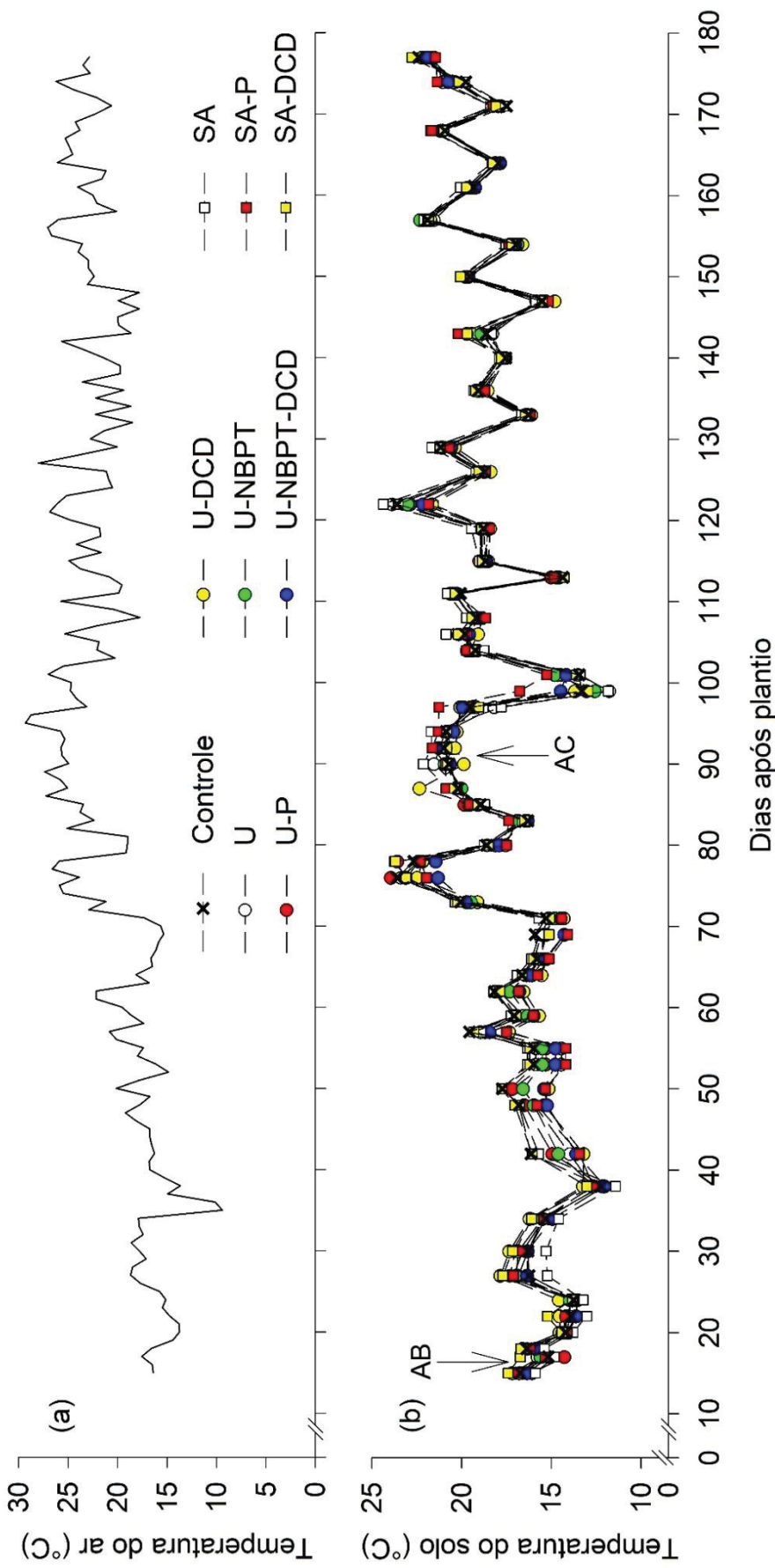
2.5.2 Atributos do ambiente e do solo

A temperatura do ar no interior da casa de vegetação (FIGURA 3a) variou de 9 a 27 °C após a adubação de base e de 18 a 29 °C após a adubação de cobertura, resultando em temperaturas médias de 19 e 23 °C para os períodos avaliados, respectivamente. A temperatura do solo (FIGURA 3b) seguiu o mesmo comportamento que a temperatura do ar, porém com menor amplitude. Os tratamentos avaliados não afetaram a temperatura do solo, que variou de 11 a 24 °C ao longo de todo o período de avaliação.

A PPA (FIGURA 4a) variou de 30 a 60% durante o período de avaliação e foi semelhante entre os tratamentos avaliados. O $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo (FIGURA 4b) variou de 4,3 a 6,2 durante o período de avaliação, e apresentou comportamento diferenciado entre as adubações. O $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo foi semelhante entre os tratamentos e manteve-se na média de 5,3 após a adubação de base. Contudo, após a adubação de cobertura, os valores de $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo dos tratamentos U, U-P, U-DCD, U-NBPT, U-NBPT-DCD e SA-P aumentaram cerca de 10% até 119 DAP, e reduziram gradativamente até próximo de 5,0 após este período. A maior diminuição do $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo após 119 DAP ocorreu em SA (em média 1 unidade), atingindo valores entre 4,5 e 5,0.

O efeito da adubação nitrogenada sobre a concentração de amônio do solo da camada 0-5 cm (FIGURA 5a) foi observada somente após a adubação de cobertura, apresentando incrementos de até 42 vezes em relação às concentrações obtidas após a adubação de base, que se mantiveram entre 0,7 e 67 mg N kg⁻¹. Após a adubação de cobertura, a concentração de amônio manteve-se na média de 550 mg N kg⁻¹ até 111 DAP, e diminuiu gradativamente até valores basais médios de 3,5 mg N kg⁻¹ ao final do período de avaliação. Os tratamentos U-DCD e SA-DCD apresentaram comportamento diferenciado, pois as concentrações médias de amônio mantiveram-se 139% maior que os demais tratamentos (média de 288,7 vs. 120,7 mg N kg⁻¹) e por mais tempo (até 143 DAP). Como resultado, as maiores intensidades de amônio para o período foram encontradas no solo de U-DCD e SA-DCD, sendo superiores a 23,04 g N kg⁻¹ (FIGURA 5a). SA também apresentou intensidade de amônio elevada (22,5 g N kg⁻¹), enquanto os demais fertilizantes nitrogenados apresentaram valores inferiores, variando de 10,31 g N kg⁻¹ em U a 15,72 g N kg⁻¹ em SA-P.

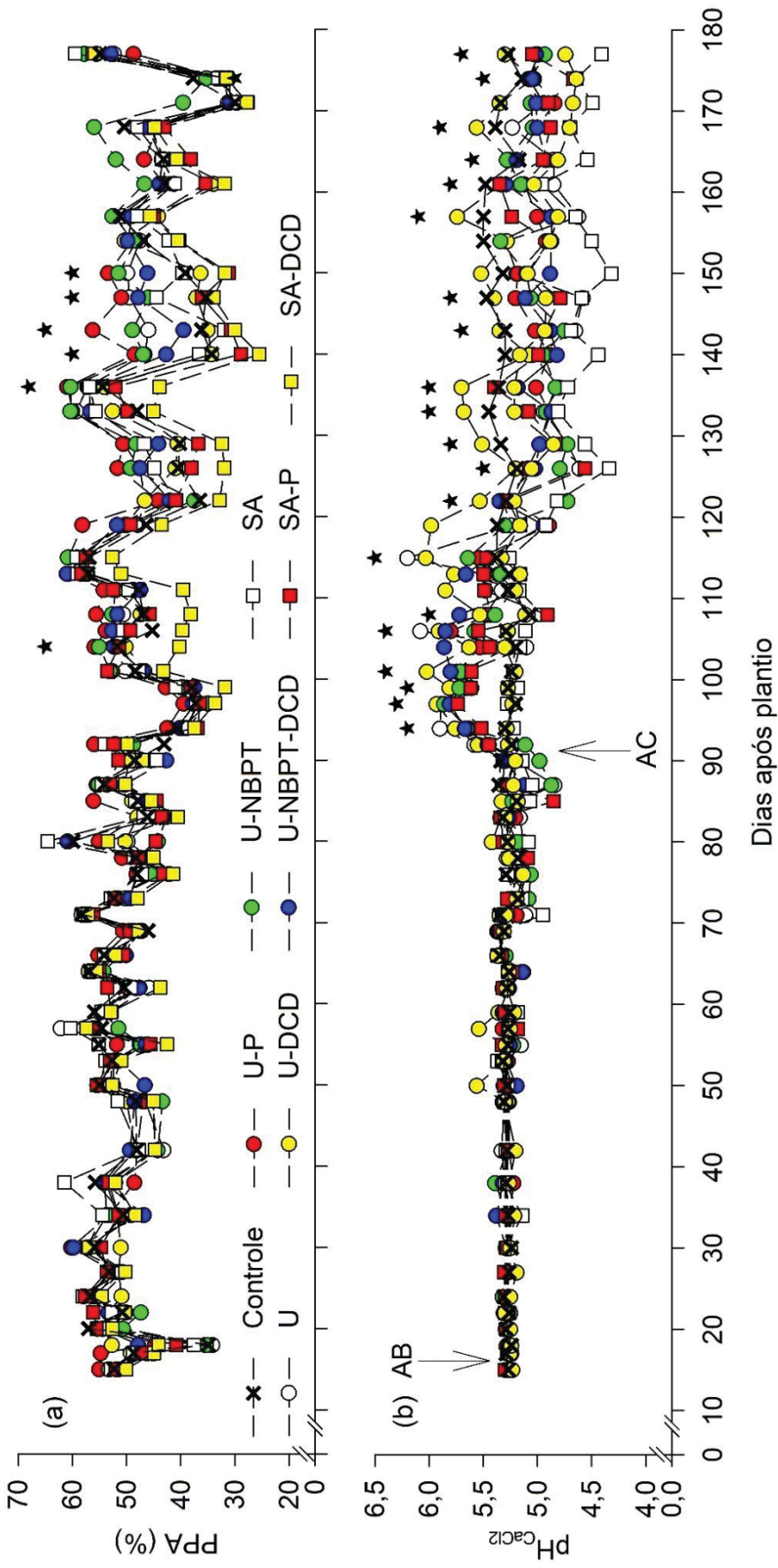
FIGURA 3 – (a) TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR NO INTERIOR DA CASA DE VEGETAÇÃO E (b) TEMPERATURA DA CAMADA 0-10 CM DO SOLO ENTRE 15 E 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; a ausência de estrelas nos eventos de amostragem de temperatura do solo indica ausência de diferença significativa entre as médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

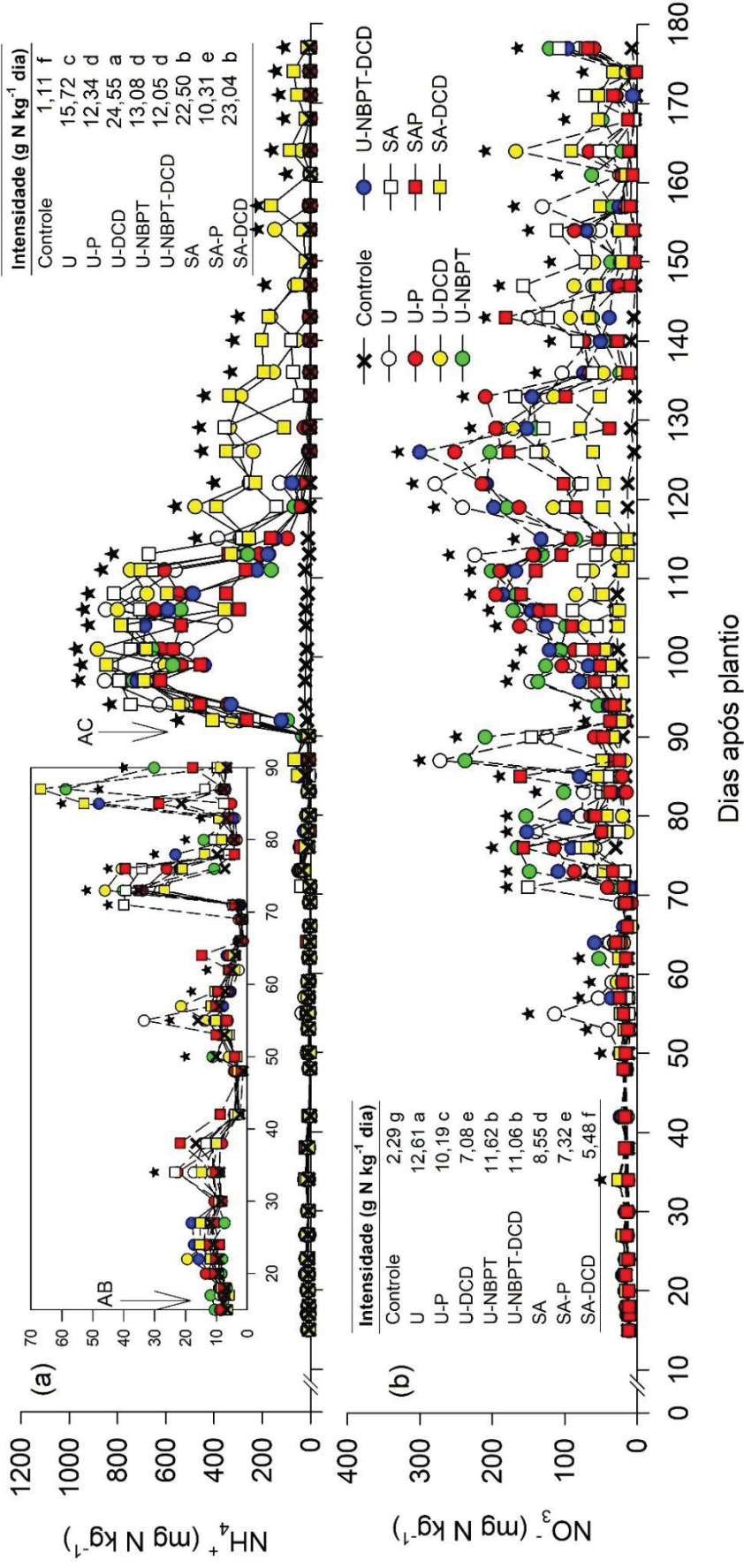
FIGURA 4 – (a) POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (PPA) E (b) pH_{CaCl_2} DA CAMADA 0-5 CM DE LATOSSOLO VERMELHO ENTRE 15 E 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; as estrelas indicam diferença significativa entre pelo menos duas médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (teste de médias de cada evento de amostragem de ar consta no Apêndice 2).

FIGURA 5 – CONCENTRAÇÃO E INTENSIDADE DE (a) AMÔNIO E (b) NITRATO DA CAMADA 0-5 CM DE LATOSSOLO VERMELHO ENTRE 15 E 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; as estrelas indicam diferença significativa entre pelo menos duas médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (teste de médias de cada evento de amostragem de ar consta no Apêndice 3).

O efeito da adubação nitrogenada sobre a concentração de nitrato do solo da camada 0-5 cm (FIGURA 5b) foi observada após 50 DAP, porém com maior intensidade após a adubação de cobertura. A concentração de nitrato do solo dos tratamentos com adubação nitrogenada aumentou gradativamente após o incremento da concentração de amônio, atingindo valor máximo de 300 mg N kg⁻¹ aos 126 DAP. De modo geral, os tratamentos U, U-P, U-NBPT e U-NBPT-DCD apresentaram concentrações de nitrato superiores às encontradas nos tratamentos U-DCD, SA e SA-DCD. Com relação às intensidades de nitrato (FIGURA 5b), valores acima de 10 g N kg⁻¹ ocorreram nos tratamentos U, U-P, U-NBPT e U-NBPT-DCD, enquanto que valores abaixo de 8,5 g N kg⁻¹ ocorreram em U-DCD, SA, SA-P e SA-DCD.

2.5.3 Correlação entre fluxos de N₂O e CH₄ e as variáveis do solo

O fluxo de óxido nitroso do solo apresentou maior correlação com a concentração de nitrato em ambas as adubações (TABELA 3), com coeficiente de correlação acima de 0,5. O fluxo de metano, por sua vez, apresentou diferentes comportamentos de correlação entre as adubações (TABELA 3). As maiores correlações foram observadas com temperatura do solo (0,621) e PPA (0,517) após adubação de base, enquanto que correlações de menor magnitude com concentração de amônio e nitrato (-0,417 e -0,368, respectivamente) foram observadas na adubação de cobertura.

TABELA 3 – CORRELAÇÃO DE PEARSON (*r*) E SIGNIFICÂNCIA (*P*) ENTRE FLUXO DE ÓXIDO NITROSO OU METANO E TEMPERATURA (T), POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (PPA), CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO (NH₄⁺), CONCENTRAÇÃO DE NITRATO (NO₃⁻) E pH_{CaCl2} DE LATOSSOLO VERMELHO NOS PERÍODOS PÓS ADUBAÇÃO DE BASE (n=270) E PÓS ADUBAÇÃO DE COBERTURA (n=261) DE MUDAS DE EUCALIPTO EM CASA DE VEGETAÇÃO. EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Gás | Período | | T | PPA | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | pH _{CaCl2} |
|------------------|---------------------------|---|--------|--------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| N ₂ O | Pós adubação de base | r | 0,517 | -0,145 | 0,076 | 0,672 | -0,492 |
| | | P | 0,001 | 0,018 | 0,214 | 0,001 | 0,001 |
| | Pós adubação de cobertura | r | -0,039 | 0,378 | 0,384 | 0,533 | 0,332 |
| | | P | 0,532 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| CH ₄ | Pós adubação de base | r | 0,621 | 0,517 | -0,145 | -0,492 | 0,076 |
| | | P | 0,001 | 0,001 | 0,017 | 0,001 | 0,214 |
| | Pós adubação de cobertura | r | -0,022 | 0,161 | -0,417 | -0,368 | 0,266 |
| | | P | 0,727 | 0,009 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |

FONTE: A autora (2020).

2.5.4 Atributos da planta

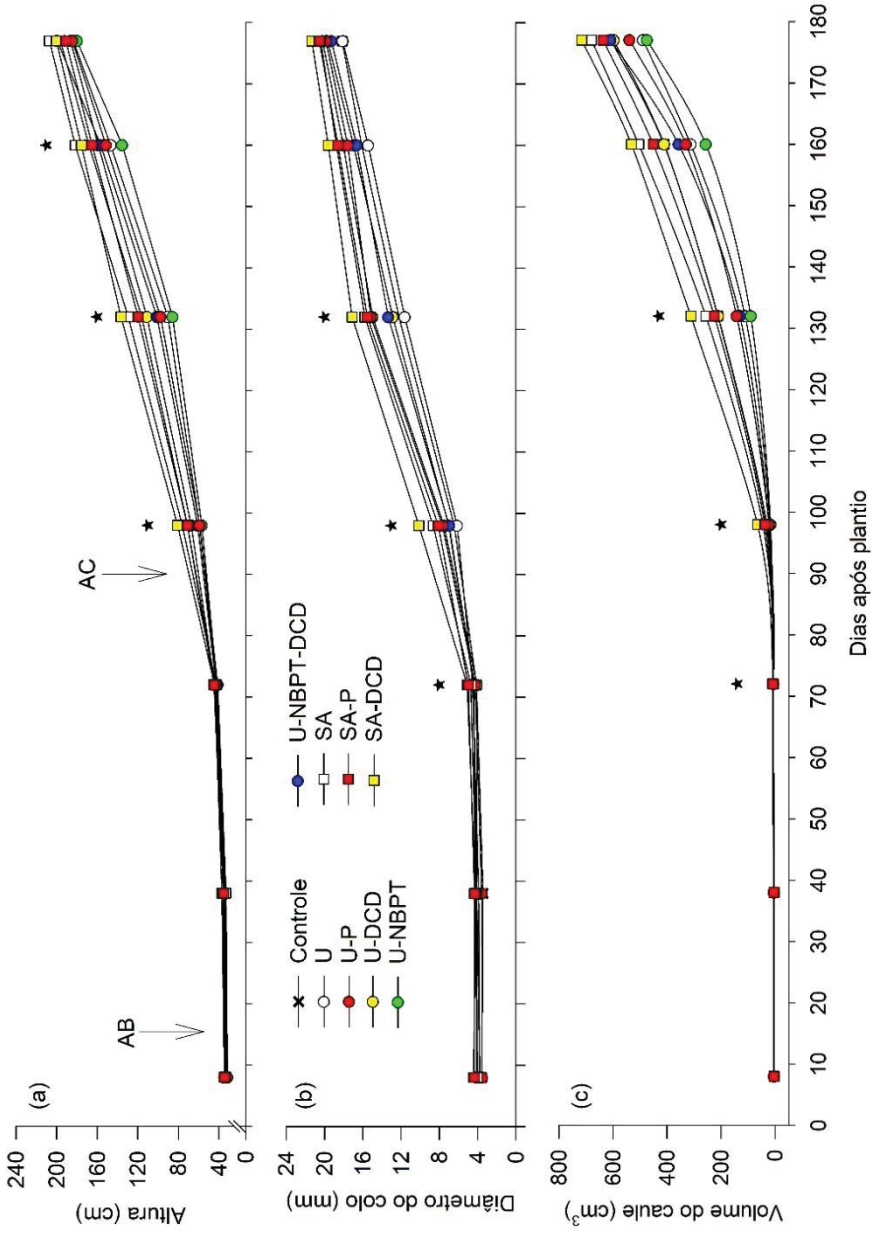
De modo geral, as variáveis altura, diâmetro e volume do caule das mudas de eucalipto (FIGURA 6) não foram afetadas pela adubação nitrogenada com fontes convencionais (U e SA) e sua associação com aditivos para eficiência aumentada, embora alguns eventos de medição tenham apresentado diferença entre tratamentos.

O conteúdo total de nitrogênio das mudas de eucalipto variou de 3,66 a 6,10 g N planta⁻¹ (TABELA 4). As mudas cultivadas em SA-DCD apresentaram o maior conteúdo de nitrogênio, cerca de 20% maior que aquelas cultivadas em U-DCD e SA (média de 4,91 g N planta⁻¹), e 36% maior que as mudas cultivadas em Controle, U, U-P, U-NBPT, U-NBPT-DCD e SA-P (média de 3,92 g N planta⁻¹). A maior proporção do conteúdo total de nitrogênio das plantas foi decorrente do conteúdo de nitrogênio do compartimento folhas (TABELA 4), com contribuição média de 52%.

Os dados de conteúdo total de nitrogênio das mudas de eucalipto foram influenciados pelos dados de concentração de nitrogênio dos compartimentos folhas, caule mais galhos e raízes, que foram diferentes entre os tratamentos (TABELA 4). A concentração de nitrogênio das raízes (TABELA 4) apresentou maior resposta aos tratamentos avaliados, sendo 72% maior que Controle (6,5 g N kg⁻¹) nos tratamentos U-DCD e AS-DCD, e 42% maior que Controle em U, U-P, U-NBPT, U-NBPT-DCD e SA-P (média de 9,2 g N kg⁻¹). Os dados de massa seca dos compartimentos avaliados, por sua vez, não apresentaram diferença entre tratamentos (TABELA 4), mantendo-se na média de 109 g N planta⁻¹ nas folhas, 138 g N planta⁻¹ no caule mais galhos e 97 g N planta⁻¹ nas raízes.

A eficiência de uso do nitrogênio das mudas de eucalipto (TABELA 4) refletiu o comportamento do conteúdo total de nitrogênio. SA apresentou EUN máximo de 11,53%, enquanto que U-DCD e SA apresentaram EUN médio de 5,96%, e U, U-P, U-NBPT, U-NBPT-DCD e SA-P de 1,49%.

FIGURA 6 – ALTURA (a), DIÂMETRO DO COLO (b) E VOLUME DO CAULE (c) DE MUDAS DE EUCALIPTO ATÉ 177 DIAS APÓS SEU PLANTIO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTILTIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: AB significa adubação de base; AC significa adubação de cobertura; as estrelas indicam diferença significativa entre pelo menos duas médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (teste de médias de cada evento de amostragem de ar constam nos Apêndices 4 e 5).

TABELA 4 - MASSA SECA (MS, g planta⁻¹), CONCENTRAÇÃO (g N kg⁻¹), CONTEÚDO DE NITROGÊNIO (g planta⁻¹) E EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO (EUN, %) APÓS 177 DIAS DE CULTIVO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO EM CASA DE VEGETAÇÃO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Fonte de N e aditivo | Folhas | | | Caule mais galhos | | | Raízes | | | Total | | | |
|----------------------|--------------|-------------|------------|-------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | MS | N | Conteúdo | MS | N | Conteúdo | MS | N | Conteúdo | MS | N | Conteúdo | EUN |
| Controle | 112,1 a | 15,6 b | 1,7 b | 140,0 a | 8,8 a | 1,2 a | 112,3 a | 6,5 c | 0,7 b | 3,66 c | | 3,66 c | nd |
| U | 104,6 a | 19,8 b | 2,1 b | 106,2 a | 10,0 a | 1,1 a | 82,6 a | 8,6 b | 0,7 b | 3,85 c | | 3,85 c | 0,91 c |
| U-P | 101,9 a | 21,9 a | 2,2 b | 116,1 a | 8,1 b | 1,0 a | 60,3 a | 9,4 b | 0,5 b | 3,74 c | | 3,74 c | 0,38 c |
| U-DCD | 108,5 a | 24,6 a | 2,7 a | 158,0 a | 7,8 b | 1,2 a | 106,4 a | 11,2 a | 1,2 a | 5,08 b | | 5,08 b | 6,73 b |
| U-NBPT | 106,1 a | 22,8 a | 2,4 a | 99,2 a | 8,9 a | 0,9 a | 72,1 a | 9,6 b | 0,7 b | 4,00 c | | 4,00 c | 1,61 c |
| U-NBPT-DCD | 102,6 a | 24,7 a | 2,5 a | 110,4 a | 6,8 b | 0,8 a | 73,4 a | 9,2 b | 0,7 b | 3,96 c | | 3,96 c | 1,46 c |
| SA | 117,3 a | 16,7 b | 2,0 b | 162,8 a | 9,8 a | 1,6 a | 100,9 a | 11,8 a | 1,2 a | 4,75 b | | 4,75 b | 5,18 b |
| SA-P | 111,6 a | 19,9 b | 2,2 b | 153,8 a | 6,3 b | 1,0 a | 113,4 a | 9,8 b | 1,1 a | 4,31 c | | 4,31 c | 3,10 c |
| SA-DCD | 117,1 a | 23,9 a | 2,8 a | 196,2 a | 8,0 b | 1,6 a | 149,3 a | 11,5 a | 1,7 a | 6,10 a | | 6,10 a | 11,53 a |
| Média | 109,0 | 21,1 | 2,3 | 138,1 | 8,3 | 1,1 | 96,8 | 9,7 | 0,9 | 4,38 | | 4,38 | 3,86 |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: nd significa não determinado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

2.6 DISCUSSÃO

A baixa emissão de N_2O do solo após adubação de base (FIGURA 1) pode estar relacionada à forma localizada de aplicação do fertilizante nitrogenado, que foi realizada em covetas. Estudos que avaliaram a aplicação do fertilizante nitrogenado em profundidade relatam que maior tempo é necessário para liberação e difusão do nitrogênio no solo e adaptação da microbiota à elevada concentração do nutriente, retardando assim os processos envolvidos na emissão de N_2O (HOU e TSURUTA, 2003; KHALIL et al., 2009).

A forma de adubação em covetas e a coleta de solo em área adjacente a coveta provavelmente também determinaram que a concentração de amônio e nitrato (FIGURAS 5a, 5b) e pH_{CaCl_2} (FIGURA 4b) não diferisse entre os tratamentos após a adubação de base. E duas hipóteses foram consideradas: i) a forma localizada de aplicação do fertilizante pode ter retardado a difusão do nitrogênio no solo, não ocorrendo diferenciação entre os tratamentos; ou ii) a amostragem do solo em local intermediário entre solo adubado e não adubado pode ter subestimado os reais valores destas variáveis.

Todavia, o efeito dos tratamentos sobre essas variáveis foi observado após a adubação de cobertura. Neste sentido, a discussão sobre o efeito dos tratamentos se baseará predominantemente no período após adubação de cobertura, que foi o único período que apresentou efeito sobre o fluxo de CH_4 do solo (FIGURA 2) e ainda contribuiu com mais de 70% da emissão de N_2O do solo do período total de estudo.

2.6.1 Fonte nitrogenada: ureia vs. sulfato de amônio

A adubação nitrogenada do eucalipto com as fontes convencionais ureia e sulfato de amônio aumentou a emissão de N_2O do solo, atingindo valores até 1000 vezes maior que o solo não adubado (TABELA 2). Entre as fontes convencionais, ureia apresentou emissão acumulada e fator de emissão de N_2O 84% maior que com sulfato de amônio (SA) (TABELA 2). Este resultado pode estar relacionado à maior taxa de nitrificação em U, processo que foi considerado predominante neste estudo, em decorrência do intervalo de PPA entre 30 e 60% (FIGURA 4a) (BATEMAN e BAGGS, 2005) e da correlação positiva entre fluxo de N_2O e concentração de nitrato (TABELA 3).

A maior taxa de nitrificação em U pode estar relacionada ao aumento do pH do solo pela hidrólise da ureia (MELLO et al., 1980), que estimulou o crescimento das

bactérias oxidantes de amônio (TONG e XU, 2012), e assim a emissão de N_2O via nitrificação (LIU et al., 2017). Esta hipótese foi considerada porque o período de maior fluxo de N_2O do solo de U (92 a 122 DAP) (FIGURA 1) coincidiu com o aumento do pH_{CaCl_2} para próximo de 6 (FIGURA 4b). Alguns estudos relatam que o aumento do pH do solo pela adição de ureia promove acúmulo de nitrito e emissão de N_2O via decomposição química do nitrito ou pelo processo de desnitrificação por nitrificadores (CLAYTON et al., 1997; TIERLING et al., 2018); mas este efeito não deve ter ocorrido neste estudo, pois a intensidade de amônio em U (FIGURA 5a) foi menor que a encontrada em SA, enquanto que a intensidade de nitrato foi maior (FIGURA 5b), indicando maior taxa de nitrificação neste tratamento.

A menor emissão de N_2O em SA pode estar relacionada ao efeito negativo do fertilizante sobre os microrganismos nitrificantes do solo. Martikainen (1985) relatou que a baixa taxa de nitrificação em solo de floresta adubado com sulfato de amônio possivelmente ocorreu devido à acidificação do solo, que por sua vez, reduziu a taxa metabólica dos microrganismos nitrificantes. Por outro lado, Tong e Xu (2012) observaram que a adubação com sulfato de amônio reduziu a população de bactérias oxidantes de amônio de solos agrícolas, porém sem efeito sobre o pH. Os resultados observados não se adequam a este estudo, pois os maiores fluxos de N_2O do solo de SA (115 a 136 DAP) (FIGURA 1) ocorreram simultaneamente com a redução do pH_{CaCl_2} para próximo de 5,0 (FIGURA 4b), indicativo de maior taxa de nitrificação neste período. Todavia, um efeito negativo sobre a população de microrganismos nitrificantes pode ter ocorrido no período inicial após a adubação de cobertura, pois menores concentrações de nitrato em SA ocorreram no período entre 90 e 110 DAP (FIGURA 5b), quando comparado a U, indicando menor taxa de nitrificação neste período.

Embora U e SA tenham apresentado emissões de N_2O do solo diferentes entre si e significativamente maiores que o Controle, os tratamentos reduziram o consumo de CH_4 do solo em menores magnitudes, atingindo valores 1,3 vezes menor que o solo não adubado e semelhantes entre si (TABELA 2). O resultado obtido é indicativo de que a adubação nitrogenada influenciou o processo de metanotrofia do solo e a principal explicação é atribuída à acidificação do solo, pois o período de menor consumo de metano ocorreu (115 e 177 DAP) quando o pH_{CaCl_2} do solo de U e SA diminuiu para média de 4,8 (FIGURA 4b). Neste sentido, a rápida acidificação do solo pode ter gerado efeito inibitório sobre a atividade metanotrófica, como também

observado por Hütsch (1998) em avaliação de solos agrícolas adubados com nitrogênio.

A correlação positiva entre fluxo de metano e $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ do solo foi observada neste estudo (TABELA 3), contudo, não é muito relatada em estudos. De modo geral, o menor consumo de CH_4 do solo pela adubação nitrogenada é decorrente do efeito inibitório do amônio (ZANATTA et al., 2010) e/ou nitrato (WANG e INESON, 2003; MOCHIZUKI et al., 2012). Neste estudo, o efeito destas variáveis não foi detectado, de modo que o fluxo de CH_4 do solo apresentou correlação negativa com as concentrações de amônio e nitrato (TABELA 3), indicando um possível estímulo à atividade microbiana. Esta relação pode ser observada no solo dos tratamentos, pois mesmo U apresentando intensidade de nitrato 47% maior que SA (FIGURA 5b), e SA apresentando intensidade de amônio 43% maior que U (FIGURA 5a), o consumo de CH_4 foi semelhante.

A maior intensidade de amônio do solo de SA pode explicar a maior eficiência de uso do nitrogênio total pelo eucalipto neste tratamento, que foi cinco vezes maior que U (TABELA 4). A maior concentração de amônio no solo possivelmente estimulou sua absorção e aumento da concentração de nitrogênio no tecido do eucalipto, pois estudos relatam que as espécies do gênero possuem maior preferência de absorção de amônio do que nitrato (GARNETT et al., 1999; WARREN e ADAMS, 2007). A eficiência energética na absorção de amônio é maior, visto que a absorção de nitrato requer energia para ação da enzima nitrato redutase nas raízes, responsável pela redução de nitrato a amônio (PFAUTSCH et al., 2009).

A eficiência de uso do nitrogênio total do eucalipto cultivado em SA foi 6 vezes menor que a encontrada por Zeng et al. (2013) em mudas de *Eucalyptus urograndis* cultivadas em casa de vegetação (EUN = 32%). A baixa eficiência de uso do nitrogênio obtida neste estudo pode estar relacionada à ausência de resposta de crescimento do eucalipto à adubação nitrogenada, fazendo com que menor quantidade de nitrogênio seja necessária. A ausência de efeito da adubação nitrogenada ocorreu nas variáveis altura, diâmetro e volume do caule de todos os tratamentos adubados (FIGURA 6). Este comportamento também foi relatado em povoamentos de eucalipto cultivados no Brasil (FERREIRA e STAPE, 2009; PULITO et al., 2015; BASSACO et al., 2018), sendo atribuído à capacidade do solo em suprir a demanda de nitrogênio da cultura (GONÇALVES et al., 2004). Geralmente, solos com elevado teor de matéria orgânica apresentam elevado potencial de mineralização de nitrogênio (PULITO et al., 2015).

Neste estudo, o solo avaliado possui elevado teor de matéria orgânica (3 a 5%), conforme SBCS (2004); e o revolvimento do solo para coleta e alocação nos vasos pode ter aumentado a taxa de mineralização de nitrogênio, suprimindo a demanda do nutriente pelas mudas de eucalipto.

2.6.2 Efeito dos polímeros e do inibidor de nitrificação

A adubação nitrogenada com fertilizantes em polímeros (U-P e SA-P) não reduziu a emissão acumulada de N_2O do solo em relação à obtida nas fontes convencionais (U e SA) (TABELA 2), embora menores fluxos de N_2O tenham ocorrido em alguns eventos de amostragem (FIGURA 1). Os polímeros retardaram a liberação de nitrogênio no solo, de modo que a concentração de amônio no período logo após a adubação de cobertura (92 a 108 DAP) foi em média 32% menor que a observada no solo de U e SA (FIGURA 5a). Este efeito difere de estudos em que a adubação com polímeros reduz emissão de N_2O do solo (MAHARJAN e VENTEREA, 2013). Geralmente, a concentração de amônio do solo adubado com fertilizantes em polímeros se mantém menor que as fontes convencionais por mais tempo, ocorrendo incrementos tardios.

Neste estudo, a baixa eficiência dos fertilizantes nitrogenados em polímeros em retardar a liberação de nitrogênio no solo pode estar relacionado às condições de umidade e temperatura. O solo foi irrigado regularmente para manter a PPA entre 40 e 60%, logo, a presença de água pode ter aumentado a difusão do nitrogênio do interior do polímero (NAZ e SULAIMAN, 2016). Associado ao efeito da umidade, a temperatura pode ter aumentado a solubilidade do fertilizante no interior do polímero. O período de maior concentração de amônio do solo ocorreu logo após a adubação de cobertura (92 a 108 DAP), quando os fertilizantes estavam sobre a superfície do solo. Neste período a temperatura média diária do ar no interior da casa de vegetação atingiu valores próximo de 25 °C (FIGURA 3a), o que pode ter aumentado a solubilidade do fertilizante nitrogenado no interior do polímero e sua liberação para o solo. Christianson (1988) observou que 72% da ureia presente no interior do polímero foi liberada para o solo quando submetida à temperatura de 30 °C.

O mecanismo de ação dos fertilizantes de liberação controlada não consiste em atuar diretamente sobre os processos de emissão de N_2O (TRENKEL, 2010), como o inibidor de nitrificação dicianodiamida. Comparativamente, a eficiência no solo dos tratamentos U-DCD e SA-DCD reduziu a emissão de N_2O em mais de 95%,

independentemente das fontes convencionais avaliadas (TABELA 2). A diminuição da taxa de nitrificação pelo DCD foi observada no solo, pois elevadas concentrações de amônio permaneceram por mais tempo (FIGURA 5a) e menores concentrações de nitrato ocorreram, quando comparado às fontes convencionais (FIGURA 5b). Este efeito também foi observado em estudos que relatam efeito significativo do DCD sobre a redução da emissão de N_2O do solo (DING et al., 2015; HINTON et al., 2015; YANG et al., 2016).

A menor taxa de nitrificação no solo de U-DCD e SA-DCD pode explicar o consumo de metano do solo 14% maior que o observado nos tratamentos U e SA (TABELA 2), pois quanto menor a taxa de nitrificação, menor a taxa de acidificação do solo. Neste estudo, o pH_{CaCl_2} do solo de U-DCD e SA-DCD após a adubação de cobertura foi em média 0,3 unidades maior que o observado em U e SA (FIGURA 4b). Essa pequena diferença pode ter promovido menor efeito inibitório às bactérias metanotróficas, que são sensíveis à alteração brusca no pH do solo, mesmo que em baixas magnitudes (HÜTSCH, 1998). Além disso, a menor taxa de nitrificação no solo de U-DCD e SA-DCD também implica em menor taxa de produção de compostos intermediários durante sua ocorrência, como hidroxilamina e nitrito, que possuem efeito tóxico às bactérias metanotróficas (WANG E INESON, 2003).

Nos tratamentos adubados com fertilizantes nitrogenados em polímeros, a semelhante taxa de nitrificação entre U e U-P (assumida pela emissão acumulada de N_2O do solo semelhante, TABELA 2) possivelmente manteve o efeito inibitório à atividade metanotrófica, refletindo em consumo de CH_4 do solo semelhante entre os tratamentos. Por outro lado, o consumo de CH_4 do solo 7% maior em SA-P do que SA (TABELA 2) pode ser efeito da presença de carbonato de cálcio na composição do polímero, que quando adicionado ao solo libera dois mols de hidroxila (OH^-) (SOUSA et al., 2007). Neste estudo, o sulfato de amônio em polímeros apresentou menor efeito sobre a acidificação do solo, apresentando comportamento diferenciado de SA. Após a adubação de cobertura, o pH_{CaCl_2} do solo de SA-P aumentou em 0,3 unidades, enquanto que em SA manteve-se basal até 115 DAP. Ainda, após este período, a acidificação do solo de SA-P foi menor, apresentando valores médios de 0,4 unidades maior que SA (FIGURA 4b). Neste sentido, embora não seja possível determinar a real contribuição da composição do polímero sobre a acidez do solo, o efeito do sulfato em polímeros em reduzir o pH do solo possivelmente diminuiu o efeito inibitório à atividade metanotrófica.

O efeito de SA-P não foi observado sobre a eficiência de uso do nitrogênio do eucalipto (TABELA 4), mantendo-se semelhante a SA. Este resultado também se repetiu entre U e U-P. Contudo, aumento da EUN foi observada nos tratamentos com DCD. As plantas cultivadas em U-DCD e SA-DCD apresentaram EUN sete e duas vezes maior que aquelas cultivadas em U e SA, respectivamente. Possivelmente, a maior intensidade de amônio do solo destes tratamentos (FIGURA 5a) (decorrentes da inibição da nitrificação pelo DCD) estimulou a absorção de nitrogênio pelo eucalipto, que como explicado anteriormente, possui preferência em absorver esta forma química.

Contudo, mesmo em condições de elevado suprimento de amônio nos tratamentos com DCD, o eucalipto ainda apresentou baixa eficiência de uso do nitrogênio. Os maiores valores de EUN em U-DCD e SA-DCD obtidos neste estudo estão aquém do encontrado em mudas de eucalipto (32%, ZENG et al., 2013) e plantio de pinus adubados com fontes convencionais (35%, RAYMOND et al., 2016). Este comportamento é indicativo de que o solo está suprimindo a demanda por nitrogênio das plantas, refletindo em baixa taxa de absorção de nitrogênio e até mesmo ausência de resposta de crescimento à adubação nitrogenada, como relatado no tópico 2.6.1. Por outro lado, mesmo que a eficiência de uso do nitrogênio das plantas submetidas à adubação nitrogenada com DCD seja baixa, ainda assim constitui um aspecto positivo, pois maior concentração de nitrogênio foi absorvido, implicando em menor probabilidade de perdas subsequentes de nitrogênio, como emissão de N_2O , N_2 ou lixiviação de nitrato.

2.6.3 Inibidor de urease vs. inibidor de urease e nitrificação

A adubação com U-NBPT não diminuiu a emissão de N_2O do solo, mantendo o FE semelhante à fonte convencional U (TABELA 2), e a principal explicação está relacionada à baixa eficiência do NBPT em reduzir a hidrólise da ureia, visto que o comportamento das concentrações de amônio e nitrato do solo (FIGURA 5a, 5b) foram semelhantes entre U e U-NBPT ao longo do período de avaliação.

Neste estudo, a baixa eficiência do NBPT no solo pode estar relacionada à elevada atividade microbiana do solo. O revolvimento do solo para coleta e alocação nos vasos provavelmente aumentou a presença de carbono lábil no solo, que associado a temperatura média do solo de 20 °C (FIGURA 3b), e a manutenção da umidade do solo em intervalo de PPA entre 40 a 60% de PPA (FIGURA 4a) constituem

condições relatadas Watson et al. (2008) e Cantarella et al. (2018) que estimulam atividade microbiana e taxa de degradação do NBPT no solo. Além da baixa eficiência do NBPT no solo, o mecanismo de ação do inibidor não atua diretamente sobre os processos de nitrificação e desnitrificação, condizendo com sua ausência de efeito na mitigação da emissão de N_2O de solos agrícolas (AKIYAMA et al., 2010).

Por outro lado, a adição de dicianodiamida em U-NBPT-DCD reduziu em 28% a emissão de N_2O do solo em relação à obtida em U-NBPT (TABELA 2). Este resultado indica efeito do inibidor de nitrificação sobre a emissão de N_2O do solo, assim como observado em estudos realizados em solos agrícolas adubados com ureia com inibidores de urease e nitrificação (MAHARJAN e VENTEREA, 2013; THAPA et al., 2015; ROCHE et al., 2016). Porém, o efeito do DCD em U-NBPT-DCD não foi observado sobre as concentrações de amônio e nitrato do solo, apresentando comportamentos semelhantes aos encontrados em U-NBPT (FIGURA 5a, 5b).

O comportamento semelhante das concentrações de amônio e nitrato e pH_{CaCl_2} do solo entre U-NBPT e U-NBPT-DCD, podendo explicar o consumo de CH_4 do solo e EUN do eucalipto semelhantes entre os tratamentos e à U (TABELA 2). Possivelmente, o mesmo efeito sobre a taxa de nitrificação e acidificação do solo promoveram efeitos semelhantes sobre a atividade metanotrófica, assim como na disponibilidade de nitrogênio para absorção pelas plantas.

2.7 CONCLUSÕES

A adubação do eucalipto com fontes nitrogenadas ureia ou sulfato de amônio com inibidor de nitrificação dicianodiamida constituiu a melhor alternativa para mitigação da emissão de gases de efeito estufa do solo, pois apresentou redução de mais de 95% da emissão de N_2O e menor efeito inibitório ao consumo de CH_4 (12%) em relação às fontes convencionais, respectivamente. Além da mitigação da emissão de N_2O do solo, a adição de DCD manteve a concentração de amônio maior por mais tempo no solo, estimulando a maior absorção de nitrogênio pelo eucalipto. Por outro lado, os fertilizantes em polímeros e a combinação de NBPT e DCD a ureia mantiveram as emissões de N_2O e CH_4 do solo e eficiência de uso do nitrogênio do eucalipto semelhantes às fontes convencionais, não apresentando potencial de mitigação da emissão dos gases de efeito estufa do solo nas condições desse estudo.

2.8 REFERÊNCIAS

AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O e NO emissions from agricultural soil: meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1837-1846, 2010.

BANERJEE, B.; PATHAK, H.; AGGARWAL, P. K. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, p. 207-214, 2002.

BASSACO, M. V. M.; MOTTA, A. C. V.; PAULETTI, V.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; FERREIRA, C. F. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v. 49, p. 681-697, 2018.

BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, p. 379-388, 2005.

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

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 120, p. 267-322, 2009.

CHRISTIANSON, C. B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea. **Fertilizer Research**, v. 16, p. 273-284, 1988.

CLAYTON, H.; MCTAGGART, I. P.; PARKER, J.; SWAN, L.; SMITH, K. A. Nitrous oxide emissions from fertilized grassland: a 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 25, p. 252-260, 1997.

DING, W. X.; CHEN, Z. M.; YU, H. Y.; LUO, J. F.; YOO, G. Y.; XIANG, J.; ZHANG, H. J.; YUAN, J. J. Nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency in response to nitrophosphate, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide of wheat cultivated soil under sub-humid monsoon conditions. **Biogeosciences**, v. 12, p. 803-815, 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 1997.

FERREIRA, J. M. A.; STAPE, J. L. Productivity gains by fertilization in *Eucalyptus urophylla* clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests**, v. 71, p. 253-258, 2009.

FORRESTAL, P. J.; HARTY, M.; CAROLAN, R.; LANIGAN, G. J.; WATSON, C. J.; LAUGHLIN, R. J.; MCNEILL, G.; CHAMBERS, B. J.; RICHARDS, K. G. Ammonia emissions from urea, stabilized urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss abatement in temperate grassland. **Soil Use and Management**, v. 32, p. 92–100, 2016.

GARNETT, T. P.; SMETHRUST, P. J. Ammonium and nitrate uptake by *Eucalyptus nitens*: effects of pH and temperature. **Plant and Soil**, v. 214, p. 133-140, 1999.

GENG, J.; CHENG, S.; FANF, H.; YU, G.; LI, X.; SI, G.; HE, S.; YU, G.; Soil nitrate accumulation explains the nonlinear responses of soil CO₂ and CH₄ fluxes to nitrogen addition in a temperate needle-broadleaved mixed forest. **Ecological Indicators**, v. 79; p. 28-36, 2017.

GILSANZ, C.; BÁEZ, D.; MISSELBROOK, T. H.; DHANOA, M. S.; CÁRDENAS, L. M. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 1-8, 2016.

GOLDEN, B.; SLATON, N.; NORMAN, R.; GBUR, E.; WILSON, C. Nitrogen release from environmentally smart nitrogen fertilizer as influenced by soil series, temperature, moisture, and incubation method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 1809-1824, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 45-61, 2004.

GREGORICH, E.; JANZEN, H. H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soil and greenhouse gas effects. **Advances in Agronomy**, v. 132, p. 39-74, 2015.

HALVORSON, A. D.; SNYDER, C. S.; BLAYLOCK, A. D.; DEL GROSSO, S. J. Enhanced-efficiency nitrogen fertilizer: potential role in nitrous oxide emission mitigation. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 715-722, 2014.

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis. 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [a]

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput). 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [b]

HINTON, N. J.; CLOY, J. M.; BELL, M. J.; CHADWICK, D. R.; TOPP, C. F. E.; REES, R. M. Managing fertiliser nitrogen to reduce nitrous oxide emissions and emission intensities from a cultivated Cambisol in Scotland. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 55-65, 2015.

HOU, A. X.; TSURUTA, H. Nitrous oxide and nitric fluxes from an upland Field in Japan: effect of urea type, placement and crop residues. **Nutrient Cycles in Agroecosystems**, v. 65, p. 191-200, 2003.

HÜTSCH, B. W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, p. 27-35, 1998.

IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). Relatório 2019. IBÁ, 2019.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate Change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, K.; TIGNOR, M.;

ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (editors). Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, p. 1-1535.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). N₂O emissions from managed soil, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (editors). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

KHALIL, M. I.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Effects of urease and nitrification inhibitors added to urea on nitrous oxide emissions from a loess soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, p. 651-660, 2009.

LIU, S.; WANG, J. J.; TIAN, Z.; WANG, X.; HARRISON, S. Ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical wheat field under different nitrogen fertilization strategies. **Journal of Environmental Sciences**, v. 57, p.196-210, 2017.

MARTIKAINEN, P. J. Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate and potassium sulphate. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, p. 363-367, 1985.

MELLO, F. A. F.; POSSÍDIO, E. L.; PEREIRA J. R.; ARAÚJO, J. P.; ABRAMOF, L.; COSTA, O. A. Efeito da adição de ureia e sulfato de amônio sobre o pH e nitrificação em um solo ácido. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 37, p. 1-10, 1980.

MOCHIZUKI, Y.; KOBAYASHI, K.; YOH, M. Strong inhibitory effect of nitrate on atmospheric methane oxidation in forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 50, p. 164-166, 2012.

MOJEREMANE, W.; REES, R. M.; MENCUCCINI, M. The effects of site preparation practices on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a peaty gley soil. **Forestry**, v. 19, p. 1-15, 2012.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, v. 225, p. 109–120, 2016.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 212, p. 283-289, 2016.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019.

PENG, Y.; WANG, G.; LI, F.; YANG, G.; FANG, H.; LIU, L.; QIN, S.; ZHANG, D.; ZHOU, G.; FANG, H.; LIU X.; LIU, C.; YANG, Y. Unimodal response of soil methane consumption to increasing nitrogen additions. **Environmental Science & Technology**, v. 53, p. 4150-4160, 2019.

PFAUTSCH, S.; RENNENBERG, H.; BELL, T. L.; ADAMS, M. A. Nitrogen uptake by *Eucalyptus regnans* and *Acacia* spp. – preferences resource overlap and energetic costs. **Tree Physiology**, v. 29, p. 389-399, 2009.

PULITO, A. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SMETHURST, P. J.; JUNIOR, J. C. A.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; HUBNER, A.; MORAES, L. F.; MIRANDA, A. C.; KAMOGAWA, M. Y.; GAVA, J. L.; CHAVES, R.; SILVA, C. R. Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in Brazilian eucalypt plantations on soils contrasting texture. **Forests**, v. 6, p. 973-991, 2015.

RAYMOND, J. E.; FOX, T. R.; STRAHM, B. D. Understanding the fate of applied nitrogen in pine plantations of the Southeastern United States Using ¹⁵N enriched fertilizers. **Forests**, v. 7, p. 1-15, 2016.

RIBEIRO, R. H.; BESEN, M. R.; SIMON, P. L.; BAYER, C.; PIVA, J. T. Enhanced-efficiency nitrogen fertilisers reduce winter losses of nitrous oxide, but not of ammonia, from no-till soil in a subtropical agroecosystem. **Soil Use and Management**, 2020.

ROCHE, L.; FORRESTAL, P. J.; LANIGAN, G. J.; RICHARDS, K. G.; SHAW, L. J.; WALL, D. P. Impact of fertilizer nitrogen formulation, and N stabilizers on nitrous oxide emissions in spring barley. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 233, p. 229-237, 2016.

SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. Porto Alegre: SBCS, 2004.

SHRESTHA, R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B.; HOLUB, S. M.; MEEHAN, N. Fertilizer management, parent material, and stand age influence forest soil greenhouse gas fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 2041-2053, 2014.

SINGH, J.; KUNHIKRISHNAN, A.; BOLAN, N. S.; SAGGAR, S. Impact of urease inhibitor and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine. **Science of the total environment**, v. 465, p. 56-63, 2013.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (editores). Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 205-274.

SUGAMOSTO, M. L. Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do Canguiri, município de Pinhais – Paraná. 149 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

TIAN, Z.; WANG, J. J.; LIU, S.; ZHANG, Z.; DODLA, S. K.; MYERS, G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of the Total Environment**, v. 533, p. 329-338, 2015.

TIERLING, J.; KUHLMANN H. Emissions of nitrous oxide (N₂O) affected by pH-related nitrite accumulation during nitrification of N fertilizers. **Geoderma**, v. 310, p. 12-21, 2018.

TONG, D.; XU, R. Effects of urea and (NH₄)₂SO₄ on nitrification and acidification of Ultisols from Southern China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 24, p. 682-689, 2012.

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

VILSMEIER, K.; BORNEMISZA, E.; AMBERGER, A. Urea, ammonium sulfate and dicyandiamide transformations in Costan Rican soils. **Fertilizer Research**, v. 12, p. 255-261, 1987.

WANG, Y.; CHENG, S.; FANG, H.; YU, G.; XU, M.; DANG, X.; LI, L.; WANG, L. Simulated nitrogen deposition reduces CH₄ uptake and increases N₂O emission from a Subtropical plantation forest soil in Southern China. **Plos One**, v. 9, p. 1-10, 2014.

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

WARREN, C. R.; ADAMS, P. R. Uptake of nitrate, ammonium and glycine by plants of Tasmanian wet eucalypt forests. **Tree Physiology**, v. 27, p. 413-419, 2007.

WATSON, C. J.; AKHONZADA, N. A.; HAMILTON, J. T. G.; MATTHEWS, D. I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 246-253, 2008.

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FERREIRA FILHO, P. J.; POGETTO, M. H. F. A. D. Guia prático de manejo de plantações de eucalipto. Botucatu: FEPAF, 2008.

YANG, M.; FANG, Y.; SUN, D.; YAUNLIANG, S. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. **Nature**, p. 1-10, 2016.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. S.; CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. 1. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. S.; CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. 1. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

ZENG, S.; JACOBS, D. F.; SLOAN, J. L.; XUE, L.; LI, Y.; CHU, S. Split fertilizer application affects growth, biomass allocation, and fertilizer uptake efficiency of hybrid *Eucalyptus*. **New Forests**, v. 44, p. 703-718, 2013.

ZHANG, K.; ZHENG, H. CHEN, F.; LI, R.; YANG, M.; OUYANG, Z. Impact of nitrogen fertilization on soil-atmosphere greenhouse gas exchanges in eucalypt plantations with different soil characteristics in southern China. **Plos One**, v. 12, p. 1-14, 2017.

3 CAPÍTULO II - EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO DE SOLO SOB EUCALIPTO: EFEITO DE INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO NA ADUBAÇÃO NITROGENADA E POSIÇÃO NO POVOAMENTO

3.1 RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar (1) o potencial do inibidor de nitrificação dicianodiamida em mitigar a emissão de óxido nitroso (N_2O) do solo associada à adubação nitrogenada em eucalipto e (2) o efeito das posições no plantio sobre a emissão de N_2O do solo. O experimento foi realizado em plantio de eucalipto sob Latossolo Vermelho distrófico argiloso. O experimento seguiu delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas. O fator primário consistiu em fontes nitrogenadas ureia e sulfato de amônio individuais ou combinadas ao inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD), bem como o solo sem adubação nitrogenada (Controle). O fator secundário consistiu em posições no plantio, sendo solo adubado (próximo da muda de eucalipto), solo da linha e da entrelinha de plantio. A avaliação do fluxo de N_2O do solo foi realizada pelo método de câmara estática fechada durante dois anos. No primeiro ano de monitoramento, o solo adubado apresentou taxa de emissão de N_2O 43% maior que o solo da linha e 59% maior que o solo da entrelinha de plantio. No solo adubado, as fontes convencionais apresentaram emissão de N_2O três vezes maior que o Controle, enquanto que as fontes com DCD reduziram a emissão de N_2O em 54%, quando comparada às fontes convencionais. O DCD ainda influenciou o comportamento da emissão de N_2O total do povoamento, apresentando emissão de N_2O 16% menor que as fontes convencionais individuais e Controle. A emissão de N_2O foi trezes vezes menor no segundo ano de cultivo do eucalipto em relação ao primeiro, e semelhante entre as posições no plantio. O uso do inibidor de nitrificação dicianodiamida com as fontes convencionais ureia ou sulfato de amônio apresentou potencial de mitigação da emissão de N_2O do solo, reduzindo a emissão do solo adubado em 54% e a emissão total do povoamento em 16%, em relação às fontes convencionais. A maior emissão de N_2O ocorreu no solo adubado, seguido da linha e entrelinha de plantio. O efeito das posições no plantio ocorreu somente no primeiro ano de avaliação, igualando-se no segundo ano de cultivo do eucalipto.

Palavras-chave: Florestas plantadas. Gás de efeito estufa. Nitrogênio. Manejo do solo.

3.2 ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate (1) the potential of dicyandiamide nitrification inhibitor to mitigate soil nitrous oxide (N₂O) emission associated with nitrogen fertilization in eucalyptus and (2) the effect of planting positions on soil N₂O emission. The experiment was carried out in an eucalyptus plantation under a clayey Oxisol. The experiment followed a randomized block design with subdivided plots. The primary factor was nitrogen sources urea and ammonium sulfate individually or combined with dicyandiamide nitrification inhibitor (DCD), as well as the soil without nitrogen fertilization (Control). The secondary factor was positions in the stand, being fertilized soil (close to eucalyptus seedling), plant row soil and plant inter-row soil. The evaluation of soil N₂O flux was carried out by the closed static chamber method for two years. In the first year of monitoring, fertilized soil had N₂O emission 43% higher than the plant row soil and 59% higher than inter-row plant soil. In fertilized soil, conventional sources showed N₂O emission three times higher than Control, while sources with DCD reduced N₂O emission by 54%, in relation to conventional sources. The DCD also influenced the stand total N₂O emission pattern, presenting N₂O emission 16% lower than conventional sources and Control. The N₂O emission was thirteen times lower in the second year of eucalyptus cultivation in relation to the first, and similar among the positions in the stand. The use of the dicyandiamide nitrification inhibitor with conventional sources urea or ammonium sulfate showed a potential to mitigate soil N₂O emission, reducing fertilized soil emission by 54% and total emission of the stand by 16%, in relation to conventional sources. The highest N₂O emission occurred in the fertilized soil, followed by row plant e inter-row plant. The effect of planting positions occurred only in the first year of evaluation, being equaled in the second year of cultivation of eucalyptus.

Keywords: Planted forests. Greenhouse gas. Nitrogen. Soil management.

3.3 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas são reconhecidas pelo seu potencial em sequestrar carbono na biomassa arbórea (FAO, 2015), por consumir metano no solo (VELOSO et al., 2019) e reduzir a emissão de óxido nitroso do solo (N_2O) que outros sistemas de uso da terra (LIVESLEY et al., 2009). Durante o ciclo florestal, o período de maior emissão de N_2O ocorre nos primeiros anos de cultivo, principalmente em povoamentos implantados após colheita florestal (SHRESTHA et al., 2015; IBARR, 2016). Neste período, as taxas de nitrificação e desnitrificação são elevadas (STRÖMGREN et al., 2016), pois considerável quantidade de nitrogênio é mineralizada ao solo como consequência da colheita da rotação anterior e preparo do solo para plantio (CARTER et al., 2002).

Nas condições de manejo florestal brasileiras e em áreas com cultivo sucessivo, o solo é subsolado (40 a 60 cm de profundidade) na entrelinha da rotação anterior (WILCKEN et al., 2008), ocorrendo amontoamento simultâneo do resíduo da colheita na antiga linha de plantio. As mudas são plantadas e a adubação de base é realizada imediatamente (ou até 10 dias após plantio) em covetas laterais à muda (WILCKEN et al., 2008). As adubações de cobertura são realizadas na projeção da copa, entre 65 e 90 dias e entre 6 e 9 meses após plantio das mudas (WILCKEN et al., 2008). Neste sentido, as operações realizadas criam três condições distintas de solo, ocorrendo nas posições de i) solo adubado, que foi submetido à subsolagem, possui influência da planta e foi submetido à adubação; ii) solo da linha de plantio, que foi subsolado, mas não adubado; e iii) solo da entrelinha de plantio, que não foi subsolado, mas submetido ao tráfego de máquinas pesadas e aporte de resíduo em sua superfície.

A posições de solo no povoamento criadas pelo manejo florestal possivelmente apresentam dinâmicas de emissão de N_2O diferentes entre si, interferindo diretamente na emissão total do povoamento. No solo da entrelinha, o tráfego de máquinas para a colheita e subsolagem pode compactar o solo (CECHIN, 2007; TASSINARI et al., 2019), aumentando o volume de microporos e diminuindo o de macroporos do solo (CECHIN, 2007), aumentando assim a retenção de água. Nesta situação, a emissão de N_2O do solo possivelmente é decorrente do processo de desnitrificação, e sua magnitude está relacionada à disponibilidade de nitrogênio no solo, que em um momento inicial pode ser imobilizado em decorrência da presença do resíduo da colheita anterior sobre a superfície do solo (BLUMFIELD e XU, 2003).

No solo da linha de plantio, a emissão de N_2O pode ser predominantemente decorrente do processo de nitrificação e atingir valores maiores que o solo da entrelinha. Neste caso, o revolvimento do solo para a subsolagem aumenta a mineralização de nitrogênio (FIALHO et al., 2018) e a aeração do solo, estimulando o processo de nitrificação (SAHRAWAT, 2008). No solo adubado, a adubação nitrogenada pode intensificar a emissão de N_2O do solo, pois a adição de nitrogênio constitui substrato para a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (CAMERON et al., 2013). Estudos realizados em solos florestais adubados com nitrogênio relatam que a emissão de N_2O do solo pode ser de duas (SHRESTHA et al., 2014) a oito vezes (WANG et al., 2014) maior que o solo não adubado.

Em termos quantitativos de emissão de N_2O , o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) estabeleceu o fator de emissão de N_2O da ureia (FE) em 1% para inventários de emissões e remoções de GEE (IPCC, 2006). O FE se refere à porcentagem do nitrogênio aplicado perdida na forma de N_2O , e embora este valor pareça baixo, a emissão de N_2O pode ser quatro vezes maior quando expressa em dióxido de carbono (CO_2) equivalente, pois seu potencial de aquecimento global é de 298 vezes maior que o CO_2 (IPCC, 2013). A emissão de GEE associada à fertilizantes nitrogenados pode ser motivo de preocupação no setor florestal brasileiro, porque o eucalipto (gênero mais cultivado) requer adubação nitrogenada em seu trato silvicultural, e sua área vem crescendo anualmente no país (cerca de 126.700 hectares, IBÁ, 2019). Estima-se que 9.500 toneladas de nitrogênio são necessárias para adubar tal área, (considerando dose média recomendada para a cultura de 75 kg N ha^{-1} , PAULETTI e MOTTA, 2019) e que cerca de 95 toneladas de nitrogênio podem ser emitidas na forma de N_2O quando o FE de 1% é considerado.

A emissão de N_2O da adubação nitrogenada pode ser reduzida pela utilização do inibidor de nitrificação dicianodiamida (DCD) em combinação com a fonte nitrogenada. O DCD atua bloqueando o sítio ativo da enzima amônia monooxigenase responsável pela oxidação de amônio, diminuindo as taxas de nitrificação e desnitrificação (GILSANZ et al., 2016). Estudos com DCD em solos agrícolas relatam redução da emissão de N_2O do solo (SOARES et al., 2015; TIAN et al., 2015) e da lixiviação de nitrato (DI e CAMERON, 2002), bem como aumento da eficiência de uso de nitrogênio pelas culturas (RAZA et al., 2019). Contudo, pouco se sabe sobre o efeito deste produto sobre a dinâmica de emissão de N_2O decorrente da adubação nitrogenada de solos florestais, que apresenta forma de aplicação localizada próximo

da planta e adubação somente até nove meses de cultivo. Neste sentido, considerando que o avanço no conhecimento da dinâmica da emissão de N₂O do solo nas posições do plantio e decorrente da adubação nitrogenada do eucalipto é necessário para criar alternativas de mitigação desta fonte de emissão, este estudo tem como objetivo avaliar (1) o potencial do inibidor de nitrificação dicianodiamida em mitigar a emissão de N₂O do solo associada à adubação nitrogenada em eucalipto e (2) o efeito das posições no plantio sobre a emissão de N₂O do solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Experimento

O experimento foi desenvolvido a campo, no município de Telêmaco Borba – PR, em área situada a 880 m de altitude, em uma região de relevo suave ondulado e clima subtropical úmido de verões amenos (Cfb, Köppen) (ALVARES et al., 2013), com precipitação média anual de 1700 mm e temperatura média anual de 18,5 °C (WREGGE et al., 2012). A vegetação nativa da região foi Floresta Ombrófila Mista em transição para Floresta Estacional Semidecidual. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2013), cujas características estão descritas na TABELA 1.

O histórico da área de estudo consiste na conversão da floresta nativa para plantio de *Pinus taeda* L. em 1966. Duas rotações com pinus foram cultivadas, sendo a primeira por 31 anos e a segunda por 20 anos. O sistema de colheita da segunda rotação foi de árvores inteiras, ocorrendo arraste das árvores recém cortadas até a margem da estrada e posterior descascamento e processamento. Neste sistema, os resíduos de copa e galhos são transformados em cavacos para a produção de bioenergia. A terceira rotação, na qual o presente estudo foi realizado, foi implantada em dezembro de 2017, com o híbrido *Eucalyptus urograndis* (Klabin 2000) (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake). O plantio das mudas foi realizado manualmente em espaçamento de 3,30 m entrelinha × 1,82 m linha, totalizando 1650 árvores ha⁻¹.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO AVALIADO NO ESTUDO. AMOSTRAGEM REALIZADA EM 2015; DOIS ANOS ANTES DO ESTUDO, QUANDO A ÁREA AINDA ESTAVA NA ROTAÇÃO DE *Pinus taeda* L. ANTERIOR (18 ANOS EM SEGUNDA ROTAÇÃO). TELÊMACO BORBA – PR.

| Característica | Camada (cm) | | | | | |
|--|--------------------|------|-------|--------------------|-------|-------|
| | 0-5 | 5-10 | 10-20 | 20-30 | 30-45 | 45-50 |
| pH _{CaCl2} | 3,7 | 4,0 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| pH _{SMP} | 4,6 | 5,0 | 5,2 | 5,3 | 5,4 | 5,5 |
| Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 5,2 | 3,8 | 3,2 | 2,9 | 2,4 | 2,3 |
| H+Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 22,0 | 14,4 | 11,3 | 9,8 | 8,3 | 7,6 |
| Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,29 | 0,18 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,12 |
| Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| SB (cmol _c dm ⁻³) | 0,38 | 0,23 | 0,17 | 0,16 | 0,13 | 0,14 |
| CTC (cmol _c dm ⁻³) | 22,3 | 14,7 | 11,5 | 10,0 | 8,4 | 7,7 |
| P (mg dm ⁻³) | 2,0 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| NT (%) | 0,23 | 0,13 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,09 |
| COT (%) | 3,8 | 1,9 | 1,7 | 1,6 | 1,3 | 1,2 |
| V (%) | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,6 | 1,5 | 1,8 |
| m (%) | 93,2 | 94,3 | 94,9 | 94,8 | 94,9 | 94,2 |
| Areia (g kg ⁻¹) | 262 ⁽¹⁾ | | | 250 ⁽²⁾ | | |
| Silte (g kg ⁻¹) | 175 | | | 175 | | |
| Argila (g kg ⁻¹) | 563 | | | 575 | | |
| DP (kg dm ⁻³) | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | nd | nd |

FONTE: IBARR (2016).

NOTA: (H+Al³⁺) foi estimado com base na equação descrita em (SBCS, 2004); ⁽¹⁾Valor médio para a camada 0-20 cm; ⁽²⁾Valor médio para a camada 20-60 cm; NT, COT, DP e nd significam nitrogênio total, carbono orgânico total, densidade de partículas e não determinado, respectivamente.

O experimento seguiu delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas, sendo o fator primário fontes nitrogenadas com inibidor de nitrificação, e fator secundário posições no plantio. As parcelas possuíam formato retangular e área de aproximadamente 120 m² (13,2 m entrelinha × 9,1 m linha), sendo que cada uma continha trinta árvores, das quais dezoito foram utilizadas como bordadura e doze úteis para avaliações.

As seguintes combinações de fontes nitrogenadas e inibidor de nitrificação foram avaliadas:

1. **Controle**, sem aplicação de fertilizante nitrogenado;
2. **U**, ureia pura;

3. **U-DCD**, ureia mais inibidor de nitrificação DCD (Sigma Aldrich®), misturado ao fertilizante no momento da adubação. A dose de DCD foi de 10% da dose de nitrogênio aplicado na forma de ureia, sendo definida através de consulta em trabalhos que o utilizam na adubação nitrogenada (VILSMEIER et al., 1987; BANERJEE et al., 2002; TIAN et al., 2015);
4. **SA**, sulfato de amônio puro;
5. **SA-DCD**, sulfato de amônio mais inibidor de nitrificação DCD (Sigma Aldrich®), misturado ao fertilizante no momento da adubação. A dose de DCD correspondeu a 10% da dose de nitrogênio aplicado na forma de sulfato de amônio e foi definida através de consulta em trabalhos que o utilizam na adubação nitrogenada (VILSMEIER et al., 1987; BANERJEE et al., 2002; TIAN et al., 2015).

A adubação nitrogenada foi realizada aos 8 e 127 dias após o plantio das mudas (DAP), correspondendo às adubações de base e cobertura, respectivamente. A adubação de base foi realizada na dose de 13 kg N ha⁻¹, correspondendo a 7,88 g N planta⁻¹. Essa dose foi dividida e aplicada em duas covetas laterais distantes 10 cm da muda, numa profundidade de 10 cm. A adubação de cobertura foi realizada sobre a superfície do solo em área correspondente à projeção da copa das árvores (diâmetro de 70 cm), em uma dose equivalente a 33 kg N ha⁻¹ (20 g N planta⁻¹). Simultaneamente à adubação nitrogenada, também foi realizada adubação fosfatada e potássica nas doses correspondentes a 156,5 kg P₂O₅ na forma de superfosfato simples (140 kg P₂O₅ na adubação de base e 16,5 kg P₂O₅ na adubação de cobertura) e 119 kg K₂O na forma de cloreto de potássio (20 kg K₂O na adubação de base e 99 kg K₂O na adubação de cobertura), respectivamente. O tratamento Controle foi adubado somente com P₂O₅ e K₂O com as mesmas doses descritas.

Dentro de cada parcela, três posições no plantio foram avaliadas, sendo:

1. **Solo adubado**: solo localizado na linha de plantio, correspondente à projeção da copa e submetido à adubação nitrogenada;
2. **Solo da linha**: solo localizado da linha de plantio, entre as mudas e sem adubação;
3. **Solo da entrelinha**: solo localizado na entrelinha de plantio e com resíduo da rotação anterior sobre sua superfície.

A adubação nitrogenada foi realizada aos 8 e 127 dias após o plantio das mudas (DAP), correspondendo às adubações de base e cobertura, respectivamente. A adubação de base foi realizada na dose de 13 kg N ha^{-1} , correspondendo a $7,88 \text{ g N planta}^{-1}$. Essa dose foi dividida e aplicada em duas covetas laterais distantes 10 cm da muda, numa profundidade de 10 cm. A adubação de cobertura foi realizada na projeção da copa das árvores, em uma dose equivalente a 33 kg N ha^{-1} ($20 \text{ g N planta}^{-1}$). Simultaneamente à adubação nitrogenada, também foi realizada adubação fosfatada e potássica nas doses correspondentes a $156,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na forma de superfosfato simples ($140 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na adubação de base e $16,5 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ na adubação de cobertura) e $119 \text{ kg K}_2\text{O}$ na forma de cloreto de potássio ($20 \text{ kg K}_2\text{O}$ na adubação de base e $99 \text{ kg K}_2\text{O}$ na adubação de cobertura), respectivamente. O tratamento Controle foi adubado somente com P_2O_5 e K_2O com as mesmas doses descritas.

3.4.2 Avaliação da emissão de N_2O do solo

A amostragem de ar para a quantificação dos fluxos de N_2O do solo foi realizada cerca de duas vezes por semana até obtenção de fluxos de N_2O basais nos períodos após as adubações de base e cobertura. Após este período, os eventos de amostragem de ar foram realizados mensalmente, até dois anos de monitoramento, totalizando 53 coletas. A amostragem de ar foi realizada pelo método da câmara estática fechada (ZANATTA et al., 2014).

Em cada parcela, três bases circulares em aço galvanizado (área interna de $0,082 \text{ m}^2$) foram instaladas após a adubação de base. As bases foram inseridas no solo a 5 cm de profundidade, sendo uma sobre uma das duas covetas de adubação, uma na linha de plantio e uma na entrelinha de plantio, como representado na FIGURA 1. As câmaras de PVC ($33,3 \text{ cm}$ de diâmetro e $35,6 \text{ cm}$ de altura) foram revestidas com manta térmica e sua parte superior possuía termômetro digital e conexão do tipo três vias para coleta da amostra de ar. A borda inferior foi revestida com tarugo de borracha de 3 cm de diâmetro.

No momento da coleta de ar, a câmara foi acoplada à base instalada no solo e o ar do interior da câmara foi coletado e analisado pelo espectrômetro automático de cavidade do tipo ring-down (Picarro G2508, Santa Clara, CA, EUA), nos intervalos de tempo de 0, 36 e 72 minutos após o fechamento da câmara. O espectrômetro é equipado com laser e detector com comprimento de onda infravermelho próximo, que quantifica a concentração de N_2O através das características espectrais das moléculas

em uma cavidade óptica. Os fluxos de N₂O (f, em µg N-N₂O m⁻² h⁻¹) foram calculados com base nas Equações 1 e 2:

$$V_{gás} = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \times V \times \frac{1}{A} \right) \div 1.000.000.000 \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{P \times V_{gás}}{R \times T} \right) \times 28 \times 1.000.000 \times 60 \quad (2)$$

Sendo V_{gás} o volume de N₂O emitido (L m⁻² min⁻¹), ΔQ Δt⁻¹ o coeficiente angular [calculado pela relação entre a concentração do gás no interior da câmara e tempo de amostragem (ηL min⁻¹)], V o volume total das quatro câmaras avaliadas em cada vaso (14,4 L), A a área total das quatro câmaras avaliada em cada vaso (0,071 m²), P a pressão atmosférica na câmara [0.906 atm para a altitude da área de estudo (950 m)], R a constante dos gases ideais (0.08206 atm L mol⁻¹ K⁻¹), T a temperatura média no interior da câmara durante o período de amostragem de ar (K).

As emissões acumuladas de N₂O da adubação de base (119 dias), da adubação de cobertura (238 dias), do primeiro e segundo ano (365 dias cada) de avaliação foram calculadas pela integração dos fluxos diários.

A emissão de N₂O do solo para cada posição no plantio foi ponderada conforme sua área de contribuição (FIGURA 1). Assim, para uma área de domínio da planta de 6 m² (3,3 m × 1,82 m), considerou-se que na adubação de base, o solo adubado contribuiu com 2,73% da emissão total (0,164 m², área de duas bases que representam as duas covetas de adubação), enquanto que solo da linha 41,51% (2,493 m²) e solo da entrelinha 55,76% (3,349 m²). Na adubação de cobertura, a área de solo adubado representou 6,41% (0,3848 m², área de projeção da copa com diâmetro de 70 cm), solo da linha 37,83% (2,272 m²) e solo da entrelinha 55,76% (3,349 m²). A soma das emissões ponderadas de N₂O das adubações de base e cobertura de cada posição no plantio constituiu a emissão total do povoamento no primeiro ano de avaliação. Para o cálculo da emissão de N₂O total do povoamento no segundo ano, considerou-se as mesmas áreas de contribuição utilizadas na adubação de cobertura.

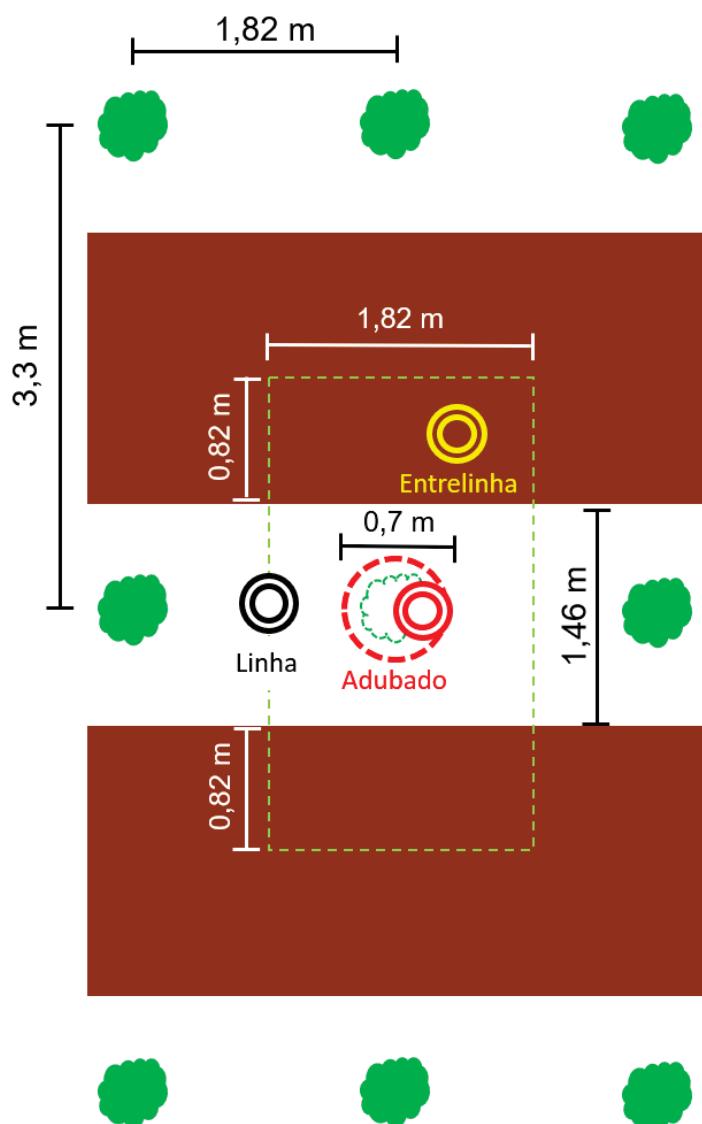
Os fatores de emissão dos fertilizantes nitrogenados (FE, em %) dos períodos após adubação de base e cobertura foram calculados pela seguinte equação:

$$FE = \frac{N-N_2O_{adubado} - N-N_2O_{controle}}{N_{aplicado}} \times 100 \quad (3)$$

Sendo N-N₂O_{adubado} a quantidade de nitrogênio emitida na forma de N₂O do tratamento adubado (g N m⁻²), N-N₂O_{controle} a quantidade de nitrogênio emitida na forma de N₂O do tratamento controle (g N m⁻²) e N_{aplicado} a quantidade total de nitrogênio aplicado no vaso via fertilizante (47,99 g N m⁻² para a adubação de base e 51,97 g N m⁻² para a

adubação de cobertura). Os valores de N aplicado via fertilizante foram calculados considerando que 7,88 g N foram aplicados em duas covetas na adubação de base (3,94 g em cada coveta e correspondendo à área de duas bases, 0,164 m²), enquanto que 20 g N foram aplicados na projeção da copa na adubação de cobertura (correspondendo a 0,3848 m²). O FE total dos fertilizantes nitrogenados do primeiro ano de avaliação foi ponderado, considerando que o FE da adubação de base correspondeu 28% do FE total e que o FE da adubação de cobertura contribuiu com 72%. Essas proporções são provenientes da contribuição da quantidade de nitrogênio aplicada em cada adubação.

FIGURA 1 – ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS BASES PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE N₂O DO SOLO E MEDIDAS CONSIDERADAS PARA O PONDERAMENTO DA EMISSÃO DE N₂O DO SOLO DAS POSIÇÕES NO PLANTIO DOS PERÍODOS APÓS ADUBAÇÃO DE BASE E COBERTURA. TELÊMACO BORBA-PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Retângulo tracejado em verde indica a área de domínio da planta.

3.4.3 Atributos climáticos e do solo

Os dados de precipitação pluviométrica e temperatura do ar nos dois anos de avaliação foram obtidos de estação meteorológica automática localizada nas coordenadas 24° 14' 49" S e 50° 35' 57" O, a uma distância de 3,9 km da área de estudo.

Em cada evento de amostragem de ar, a temperatura do solo da camada 0-10 cm foi monitorada com termômetro digital tipo espeto. Já em 32 dos 53 eventos de amostragem de ar, amostras de solo da camada 0-10 cm foram coletadas com trado calador, em local intermediário a coveta e solo sem adubação no período após adubação de base, e de forma aleatória no período após adubação de cobertura. Duas sub-amostras foram coletadas para constituir uma.

As amostras foram peneiradas em malha de 2 mm. Uma sub-amostra de 10 g de solo foi utilizada para a determinação da umidade gravimétrica, através de secagem em estufa a 105 °C (EMBRAPA, 1997). E uma sub-amostra de 5 g de solo foi utilizada para a extração de amônio e nitrato com solução de KCl 2 mol L⁻¹. As concentrações de amônio e nitrato foram determinadas por espectrofotometria em sistema de análise por injeção em fluxo (FIA), pelo método do salicilato e da coluna de cádmio, respectivamente (HAMBRIDGE, 2007 a,b).

A porosidade preenchida por água (PPA) do solo foi calculada com base nos dados de umidade gravimétrica, densidade de partículas (TABELA 1) e densidade do solo, sendo a última determinada em fevereiro de 2019. Neste evento, amostras indeformadas de solo dos locais adubado, linha e entrelinha foram coletadas das camadas 0-5 e 5-10 cm com cilindros volumétricos de 98 cm³. A macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo foram determinadas, conforme métodos descritos em Embrapa (1997). A densidade do solo da camada 0-10 cm do solo foi calculada pela média das densidades obtidas nas camadas 0-5 e 5-10 cm.

3.4.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (Bartlett). Quando não atendido os pressupostos destes testes, os dados foram então transformados pela máxima potência de Box-Cox. A análise de variância (ANOVA) foi realizada considerando delineamento experimental em blocos casualizados com parcelas subdividida, sendo fator primário fontes nitrogenadas com inibidor de nitrificação e fator secundário posições no plantio. As médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,10$). A correlação de

Pearson foi realizada entre as variáveis temperatura, PPA, concentrações de amônio e nitrato do solo sobre os fluxos de N₂O.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Emissão de N₂O do solo

Os fluxos de N₂O do solo adubado no primeiro ano de avaliação variaram de -4 a 1151 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, e apresentaram diferentes magnitudes entre as adubações (FIGURA 2a). A maior emissão de N₂O do solo (1151 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ocorreu logo após a adubação de base, de modo que os fluxos aumentaram rapidamente com a adubação, ocorrendo picos de emissão de mais de 1000 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ aos 25 e 45 DAP no solo adubado com SA. Os fluxos de N₂O do solo se mantiveram elevados até 73 DAP, reduzindo para média basal de 45 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ até 108 DAP. De modo geral, os tratamentos U e SA apresentaram os maiores fluxos de N₂O, enquanto que os menores foram observados nos tratamentos com DCD.

Os fluxos de N₂O do solo adubado após a adubação de cobertura variaram de -1 a 84 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, sendo maiores no solo de U (média de 29 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), seguido de SA e U-DCD (média de 21 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), e SA-DCD (média de 13 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). O efeito da adubação foi observado sobre os fluxos de N₂O do solo até 304 DAP, reduzindo gradativamente até permanecerem basais no final do primeiro ano (em média 3 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). A emissão de N₂O basal se estendeu para o segundo ano de avaliação (FIGURA 2b), com fluxos variando -3 a 7 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Neste período não foi observado efeito dos fertilizantes nitrogenados sobre a emissão de N₂O do solo, exceto em eventos de amostragem isolados.

As maiores emissões acumuladas de N₂O no período após a adubação de base (TABELA 2) ocorreram no solo adubado com ureia e sulfato de amônio (média de 483 mg N m^{-2}), que por sua vez, apresentaram emissões 64% maiores que o Controle (153 mg N m^{-2}) e os tratamentos com DCD (média de 192 mg N m^{-2}). Os fatores de emissão dos fertilizantes neste período (TABELA 2) foram em média 0,68% para U e SA, e de 0,12% para U-DCD e SA-DCD. A emissão de N₂O do solo adubado no período após a adubação de cobertura foi cerca de 4 a 10 vezes menor que a encontrada nos tratamentos adubados com nitrogênio no período após adubação de base (TABELA 2). O solo adubado com ureia apresentou a maior emissão de N₂O (82 mg N m^{-2}), seguido de SA e U-DCD (média de 52 mg N m^{-2}), e de SA-DCD e Controle (média de

33 mg N m⁻²). Os fatores de emissão variaram de 0,00% em SA-DCD a 0,09% em U (TABELA 2).

TABELA 2 - EMISSÃO ACUMULADA DE ÓXIDO NITROSO (mg N m⁻²) E FATOR DE EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO (%) APÓS ADUBAÇÃO DE BASE (119 DIAS), ADUBAÇÃO DE COBERTURA (238 DIAS) E TOTAL DE 1 ANO DE CULTIVO DE EUCALIPTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO, SENDO AS PLANTAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA- PR, 2018.

| Tratamento | Após adubação de base | | Após adubação de cobertura | | Total | |
|------------|-----------------------|---------|----------------------------|--------|------------------|--------|
| | N ₂ O | FE | N ₂ O | FE | N ₂ O | FE |
| Controle | 153 c | 0,00 c | 32 c | 0,00 c | 186 b | 0,00 b |
| U | 403 ab | 0,52 ab | 82 a | 0,09 a | 485 a | 0,21 a |
| U-DCD | 238 c | 0,18 c | 51 b | 0,03 b | 290 b | 0,07 b |
| SA | 563 a | 0,85 a | 53 b | 0,04 b | 617 a | 0,27 a |
| SA-DCD | 186 c | 0,07 c | 34 c | 0,00 c | 220 b | 0,02 b |

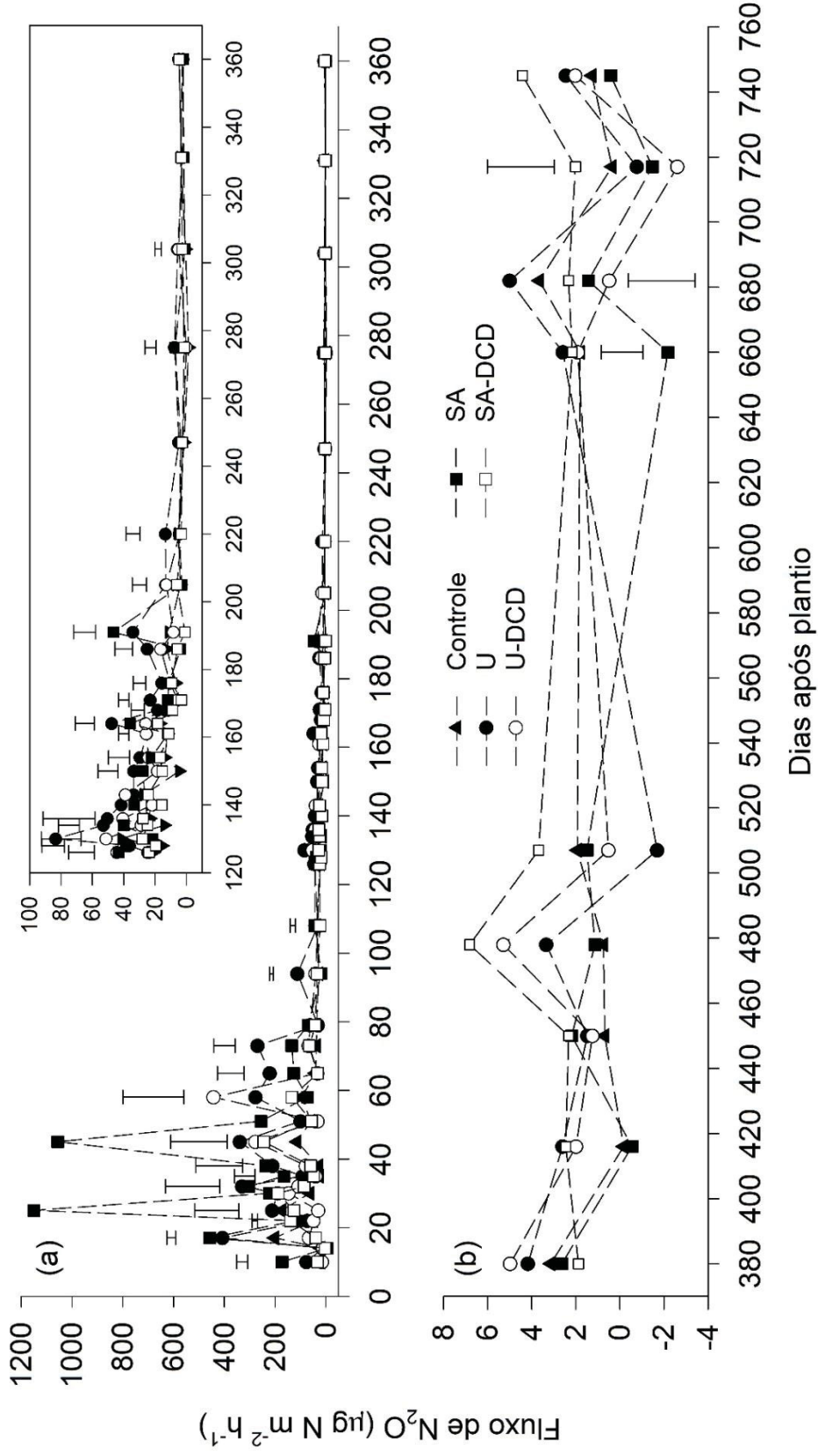
FONTE: A autora (2020).

NOTA: médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p<0,10).

A emissão acumulada total de N₂O do solo adubado no primeiro ano de avaliação (TABELA 2) foi três vezes maior nas fontes ureia e sulfato de amônio (média de 551 mg N m⁻² ano⁻¹) do que no Controle (186 mg N m⁻² ano⁻¹). Os tratamentos com DCD (U-DCD e SA-DCD) apresentaram emissão de N₂O semelhantes entre si (média de 255 mg N m⁻² ano⁻¹) e ao controle, e 54% menor que as fontes convencionais. O fator de emissão total de N₂O dos fertilizantes foi em média 0,24% para ureia e sulfato de amônio, e 0,04% para as fontes convencionais com DCD.

A emissão acumulada de N₂O do solo adubado do segundo ano de avaliação apresentou magnitude 128 vezes menor que o primeiro ano de avaliação (Emissão não ponderada, TABELA 3). Os fertilizantes nitrogenados não apresentaram efeito sobre a emissão de N₂O do solo no segundo ano, mantendo-se na média de 14 mg N m⁻² ano⁻¹.

FIGURA 2 - FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO DE LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM EUCALIPTO DURANTE PRIMEIRO ANO (a) E SEGUNDO ANO (b) APÓS ADUBAÇÃO NITROGENADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey (p < 0,10).

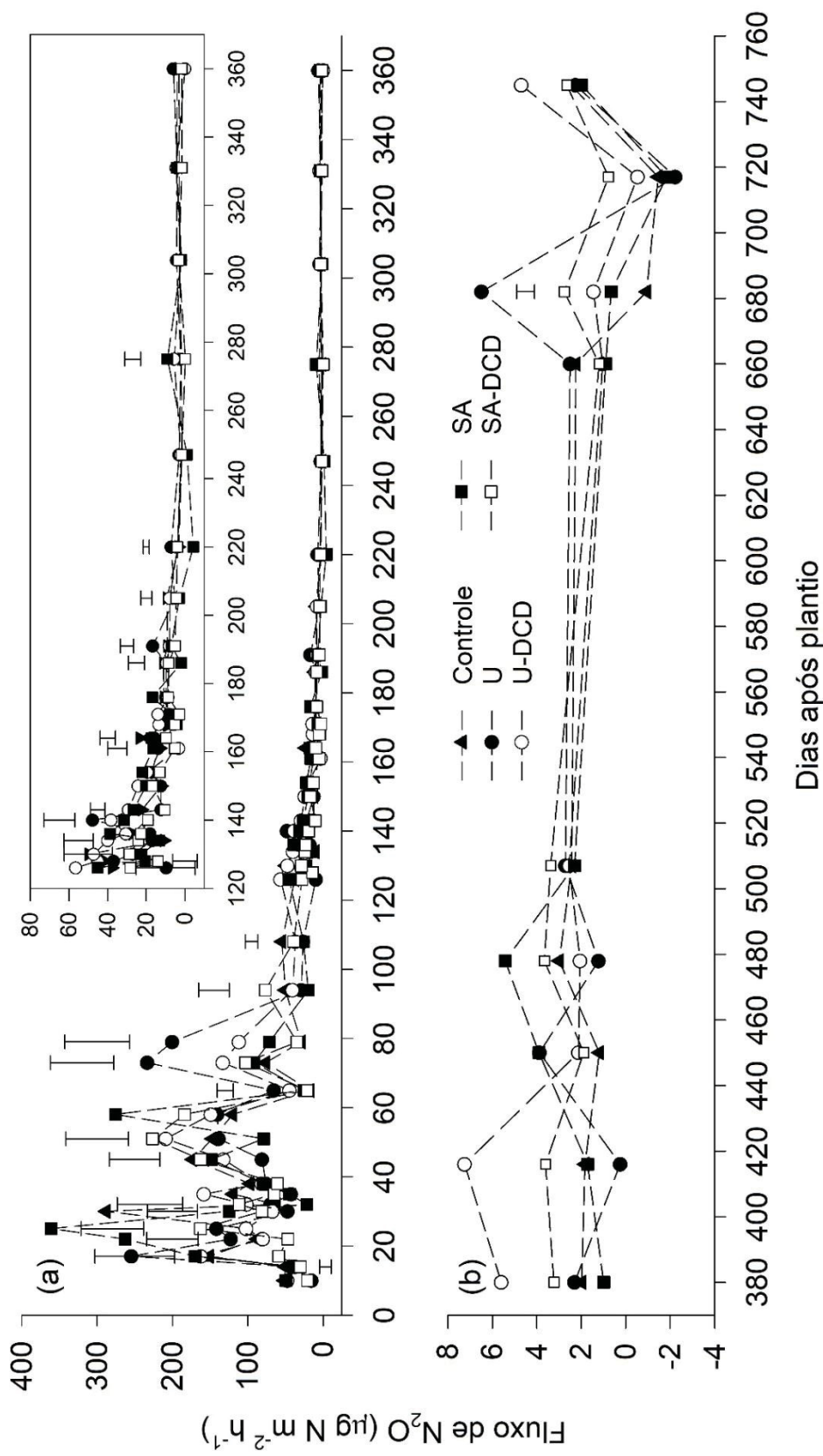
Os fluxos de N₂O do solo da linha de plantio variou de -4 a 361 µg N m⁻² h⁻¹ durante os dois anos de avaliação (FIGURA 3a). As maiores emissões ocorreram entre 10 e 79 DAP (-4 a 361 µg N m⁻² h⁻¹), e após este período, mantiveram-se na média de 16 µg N m⁻² h⁻¹ até o final do primeiro ano de avaliação e na média de 2 µg N m⁻² h⁻¹ durante o segundo ano (FIGURA 3b).

Os fluxos de N₂O do solo da entrelinha de plantio variaram de -1 a 575 µg N m⁻² h⁻¹ durante o período de monitoramento (FIGURA 4a), porém a maioria dos eventos de amostragem se mantiveram entre -1 e 260 µg N m⁻² h⁻¹. As maiores emissões de N₂O do solo ocorreram até 79 DAP, reduzindo para 12 µg N m⁻² h⁻¹ até o final do primeiro ano, e mantendo-se na média de 3 µg N m⁻² h⁻¹ durante o segundo ano de avaliação (FIGURA 4b).

A adubação nitrogenada não influenciou a emissão de N₂O do solo da linha e da entrelinha em ambos anos de avaliação (Emissão não ponderada, TABELA 3). Contudo, a emissão de N₂O do solo adubado com nitrogênio no primeiro ano de cultivo foi maior entre as outras posições no plantio avaliadas, sendo em média 43% maior que o solo da linha (403 vs. 281 mg N m⁻² ano⁻¹) e 59% maior que o solo da entrelinha (403 vs. 254 mg N m⁻² ano⁻¹) (Emissão não ponderada, TABELA 3). O solo da linha por sua vez, apresentou emissão de N₂O média 11% maior que o solo da entrelinha (281 vs. 254 mg N m⁻² ano⁻¹). No segundo ano de avaliação, as emissões de N₂O do solo nas posições no plantio foram em geral semelhantes entre si e em média treze vezes menor que a média obtida para as posições de plantio do primeiro ano (média de 313 mg N m⁻² ano⁻¹ no ano 1 vs. 24 mg N m⁻² ano⁻¹ no ano 2) (Emissão não ponderada, TABELA 3).

A emissão de N₂O total do solo do povoamento no ano 1 foi equivalente à 2,7 kg N ha⁻¹ e reduziu para 0,2 kg N ha⁻¹ no segundo ano de avaliação (Emissão ponderada, TABELA 3). Os fertilizantes nitrogenados apresentaram efeito sobre a emissão total de N₂O do povoamento (Emissão ponderada, TABELA 3). Os tratamentos adubados com DCD apresentaram as menores emissões de N₂O, sendo a emissão de N₂O do solo adubado com U-DCD 23% menor que U (2,45 vs. 3,20 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) e de SA-DCD 16% menor que SA (2,22 vs. 2,65 kg N ha⁻¹ ano⁻¹). Os tratamentos com DCD ainda apresentaram emissão de N₂O 19% menor que o solo do Controle (média de 2,33 vs. 2,90 kg N ha⁻¹ ano⁻¹). As fontes convencionais, por sua vez, mantiveram emissão de N₂O total do povoamento semelhante ao controle (média de 2,92 kg N ha⁻¹ ano⁻¹). No segundo ano de avaliação não foi observado efeito da adubação nitrogenada sobre a emissão de N₂O total do povoamento (Emissão ponderada, TABELA 3).

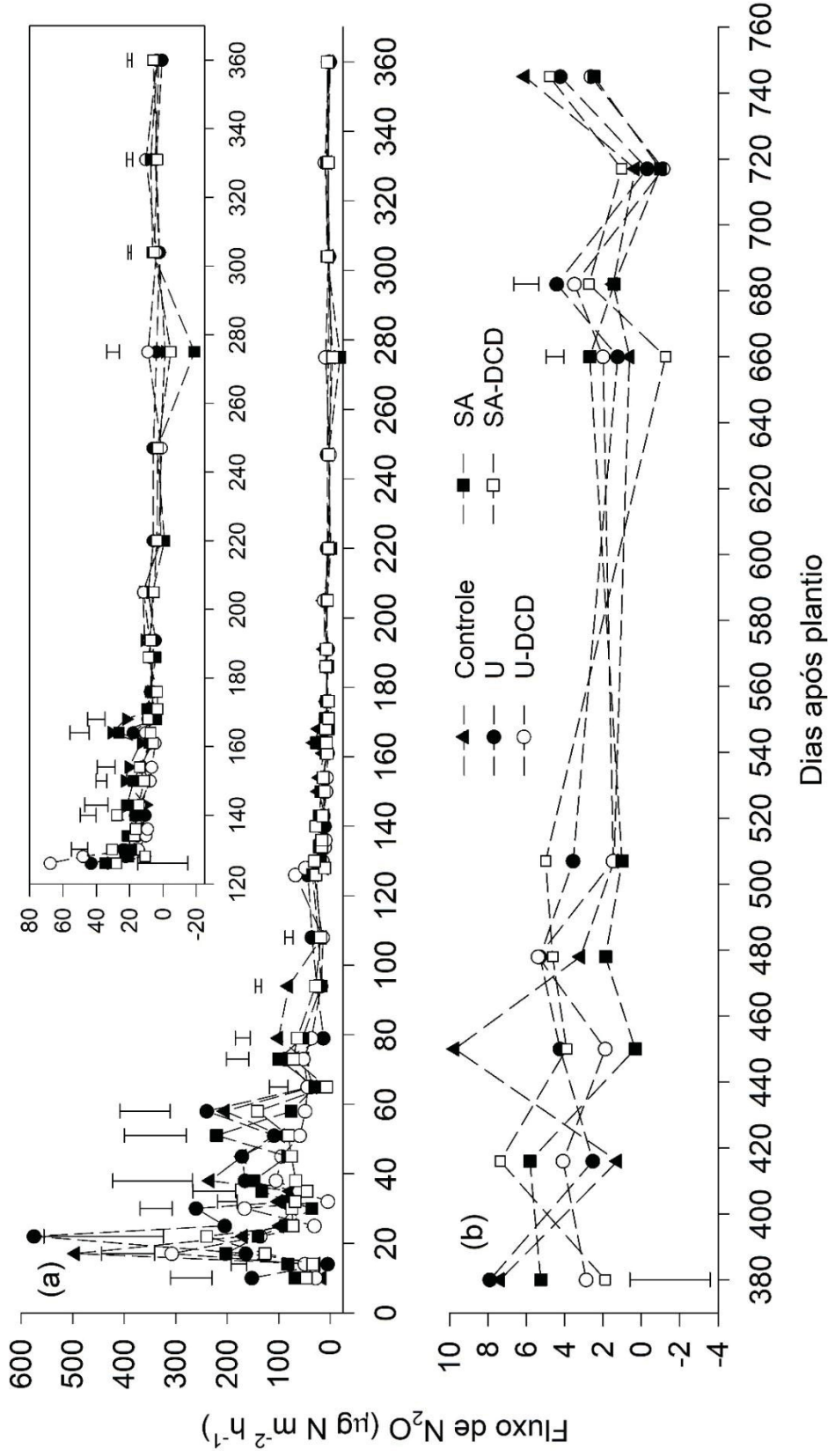
FIGURA 3 - FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO DE LATOSSOLO VERMELHO LOCALIZADO NA LINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO DURANTE PRIMEIRO ANO (a) E SEGUNDO ANO (b) APÓS ADUBAÇÃO NITROGENADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD), SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA NO SOLO PRÓXIMO DA PLANTA. TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

FIGURA 4 - FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO DE LATOSSOLO VERMELHO LOCALIZADO NA ENTRELINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO DURANTE PRIMEIRO ANO (a) E SEGUNDO ANO (b) APÓS ADUBAÇÃO NITROGENADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD), SENDO A ADUBAÇÃO NITROGENADA REALIZADA NO SOLO PRÓXIMO DA PLANTA. TELÊMACO BORBA - PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

TABELA 3 – EMISSÃO ACUMULADA DE ÓXIDO NITROSO (NÃO PONDERADA E PONDERADA) DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO, DA LINHA E DA ENTRELINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO EM DOIS ANOS DE AVALIAÇÃO, SENDO AS PLANTAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA- PR, 2018 E 2019.

| Tratamento | Ano 1 (2018) | | | Ano 2 (2019) | | | | |
|------------|---|----------|------------|--------------|-----------|----------|------------|--------|
| | Adubado | Linha | Entrelinha | Total | Adubado | Linha | Entrelinha | Total |
| | <i>Emissão não ponderada (mg N m⁻² ano⁻¹)</i> | | | | | | | |
| Controle | 186 B b | 267 A a | 313 A a | nd | 14 A a | 15 A a | 22 A a | nd |
| U | 485 A a | 300 B a | 324 B a | nd | 13 B a | 20 AB a | 28 A a | nd |
| U-DCD | 290 A b | 294 A a | 205 B a | nd | 14 A a | 21 A a | 20 A a | nd |
| SA | 617 A a | 290 B a | 229 C a | nd | 3 B a | 15 A a | 19 A a | nd |
| SA-DCD | 220 AB b | 252 A a | 200 B a | nd | 26 A a | 22 A a | 25 A a | nd |
| Média | 403 | 281 | 254 | | 14 | 19 | 38 | |
| | <i>Emissão ponderada (kg N ha⁻¹ ano⁻¹)</i> | | | | | | | |
| Controle | 0,06 C b | 1,09 B a | 1,75 A a | 2,90 ab | 0,009 C a | 0,06 B a | 0,12 A a | 0,18 a |
| U | 0,16 C a | 1,23 B a | 1,81 A a | 3,20 a | 0,009 C a | 0,08 B a | 0,15 A a | 0,24 a |
| U-DCD | 0,10 B b | 1,21 A a | 1,14 A a | 2,45 bc | 0,009 C a | 0,08 B a | 0,11 A a | 0,20 a |
| SA | 0,19 B a | 1,19 A a | 1,27 A a | 2,65 b | 0,002 C a | 0,06 B a | 0,10 A a | 0,16 a |
| SA-DCD | 0,07 B b | 1,03 A a | 1,11 A a | 2,22 c | 0,017 C a | 0,08 B a | 0,14 A a | 0,24 a |
| Média | 0,12 | 1,15 | 1,42 | 2,68 | 0,009 | 0,07 | 0,13 | 0,21 |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Letras maiúsculas comparam locais para uma mesma fonte de nitrogênio e letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio para um mesmo local, ambos pelo teste de Tukey (p<0,10); nd significa não determinado; Média da emissão não ponderada do solo adubado do Ano 1 foi calculada pela média dos valores dos tratamentos adubados com nitrogênio.

3.5.2 Atributos climáticos e do solo

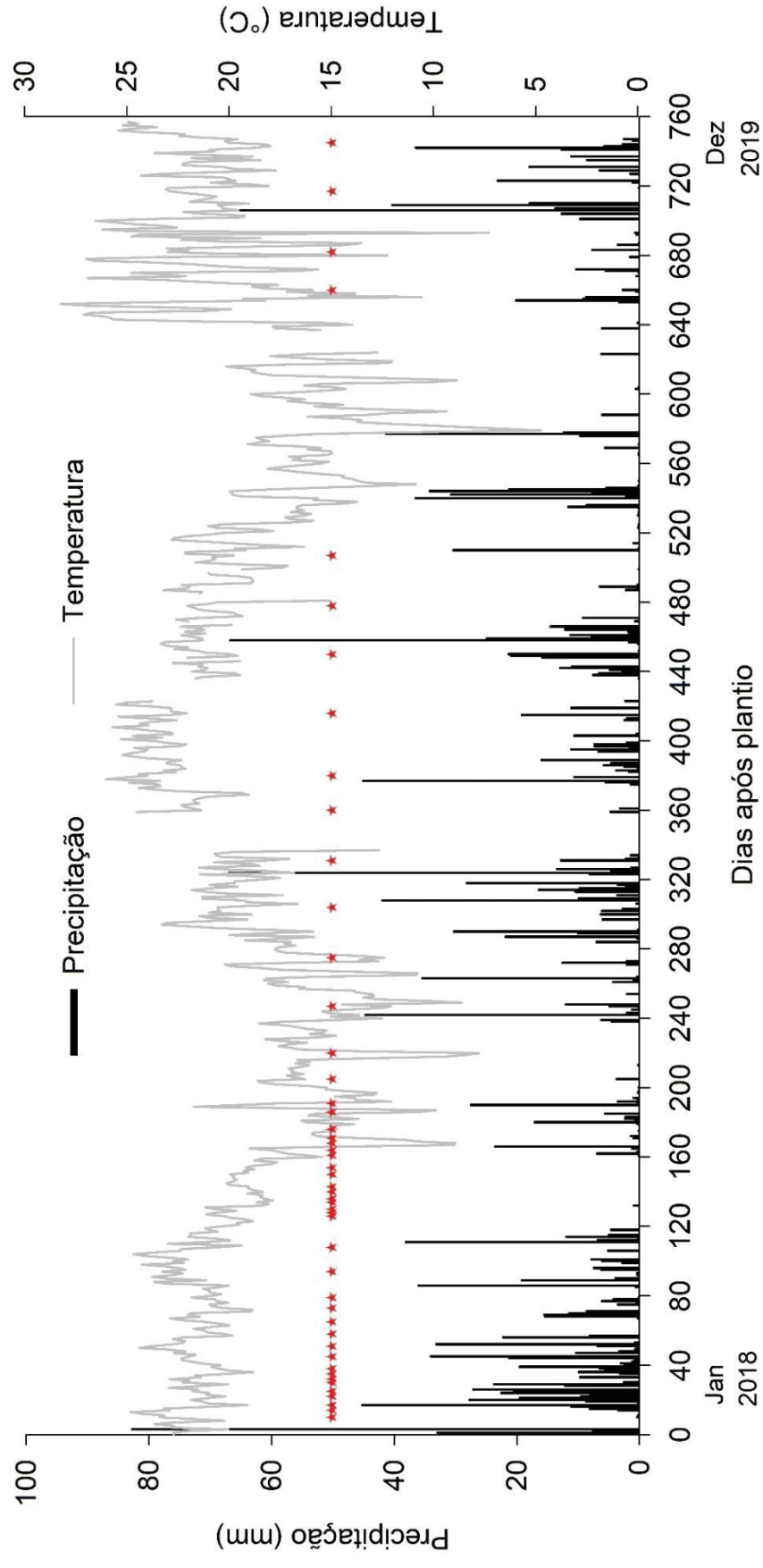
A precipitação pluviométrica do primeiro ano de avaliação foi caracterizada por períodos de seca entre 120 e 160 DAP (3,5 mm), 200 e 240 DAP (17 mm) e 332 e 360 DAP (9 mm), e ocorrência de chuvas com elevada intensidade, atingindo valor máximo de 83 mm dia⁻¹ (FIGURA 5). Durante o primeiro ano, o período de adubação de base coincidiu com a ocorrência de chuvas frequentes, enquanto que período de seca de 34 dias ocorreu após a adubação de cobertura. A precipitação acumulada do primeiro ano de avaliação foi de 1399 mm. O segundo ano de avaliação apresentou precipitação acumulada de 1022 mm (FIGURA 5), sendo caracterizado por menores períodos de seca e ocorrência de chuvas com menor intensidade diária (máximo de 67 mm dia⁻¹).

A temperatura média diária do ar apresentou comportamento semelhante em ambos anos de avaliação (FIGURA 5). O período mais frio ocorreu entre 160 e 300, 520 e 540 DAP (média de 15 °C), coincidindo com os meses de maio a setembro. O período mais quente ocorreu entre 0 e 160, 300 e 520, 640 e 760 DAP (média de 21 °C), correspondendo aos meses de outubro a maio.

Não houve efeito dos fertilizantes na temperatura do solo (FIGURA 6). A temperatura do solo das três posições no plantio avaliadas variou de 10 a 29 °C, mantendo-se na média entre 21 e 22 °C durante os dois anos de avaliação (FIGURA 6). A maior amplitude de temperatura do solo foi observada até 275 DAP, sendo acima de 20 °C até 161 DAP e abaixo deste valor até o final do período. Após 280 DAP, a temperatura média do solo das posições no plantio manteve-se na média de 21°C. Durante o período de dois anos de avaliação, a temperatura do solo da entrelinha variou de forma menos brusca (FIGURA 6c) em relação ao solo adubado e da linha de plantio (FIGURAS 5a, 5b).

A PPA não foi influenciada significativamente pelos tratamentos (FIGURA 7). A PPA variou de 26 a 67% no solo adubado e da linha (FIGURAS 6a, 6b) e de 33 a 96% no solo da entrelinha de plantio (FIGURA 7c) durante os dois anos de monitoramento, sendo que boa parte desta variação ocorreu até 108 DAP. Após este período e até o final do segundo ano, a variação de PPA foi de 25 a 54% no solo adubado e da linha (média de 39%) e de 34 a 72% no solo da entrelinha de plantio (média de 52%).

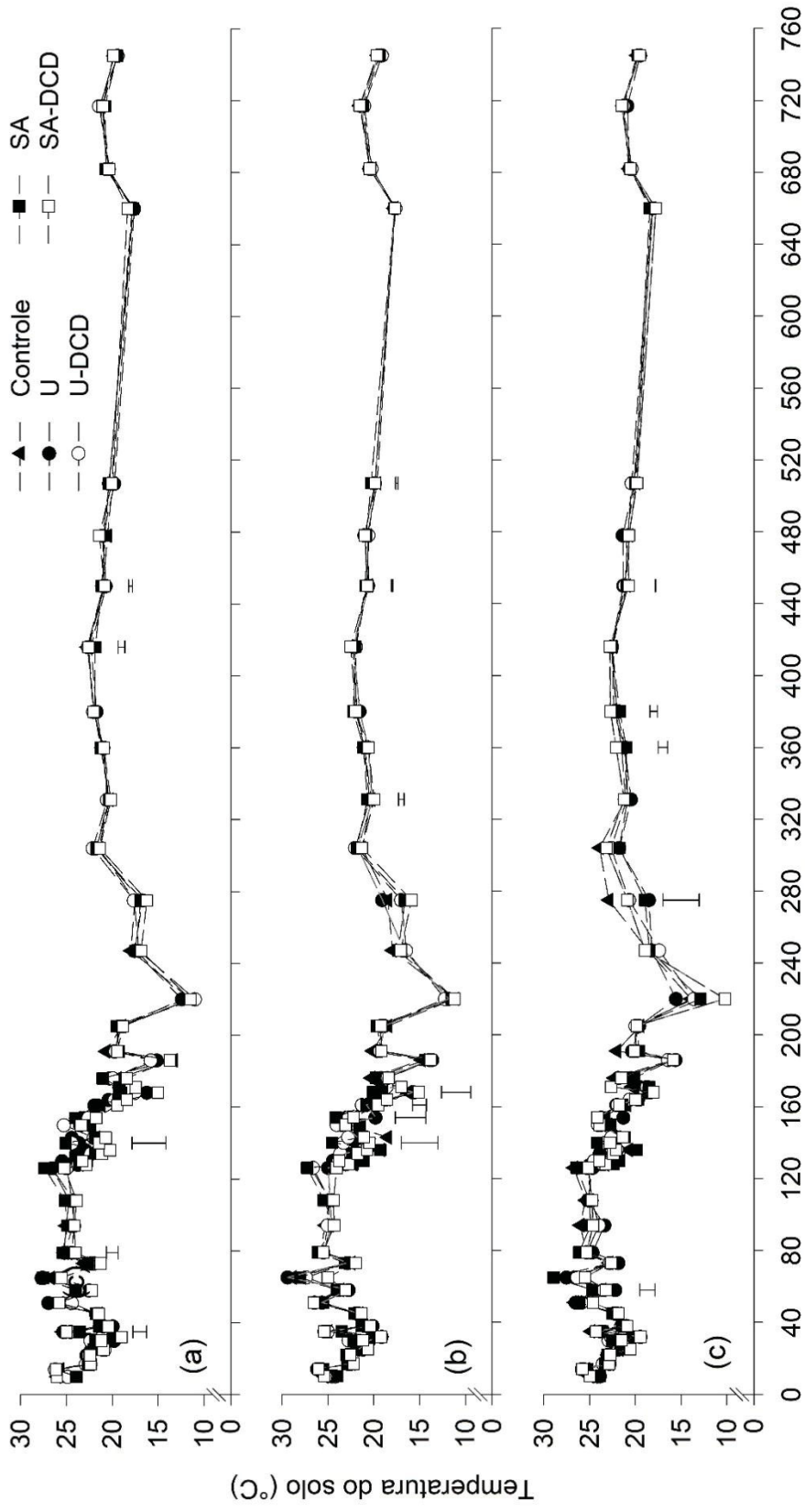
FIGURA 5 – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR ENTRE 10 E 730 DIAS APÓS PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO, TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: Empresa Florestal Klabin (2020).

LEGENDA: As estrelas em vermelho indicam os eventos de amostragem de ar realizados.

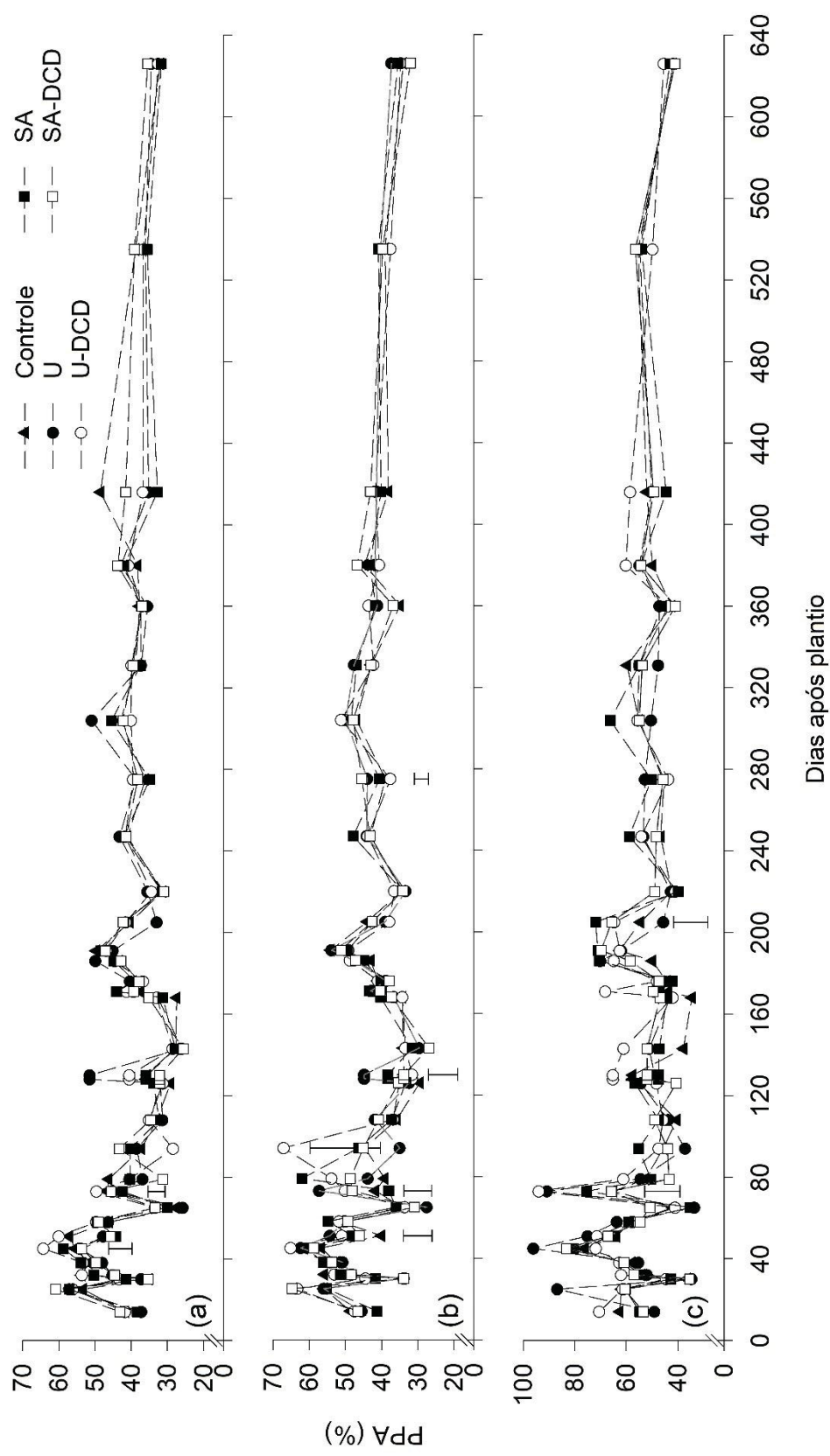
FIGURA 6 – TEMPERATURA DA CAMADA 0-10 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO (a), DA LINHA (b) E DA ENTRELINHA (c) DE PLANTIO DE EUCALIPTO, SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

FIGURA 7 – POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (PPA) DA CAMADA 0-10 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO (a), DA LINHA (b) E DA ENTRELINHA (c) DE PLANTIO DE EUCALIPTO, SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÉMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

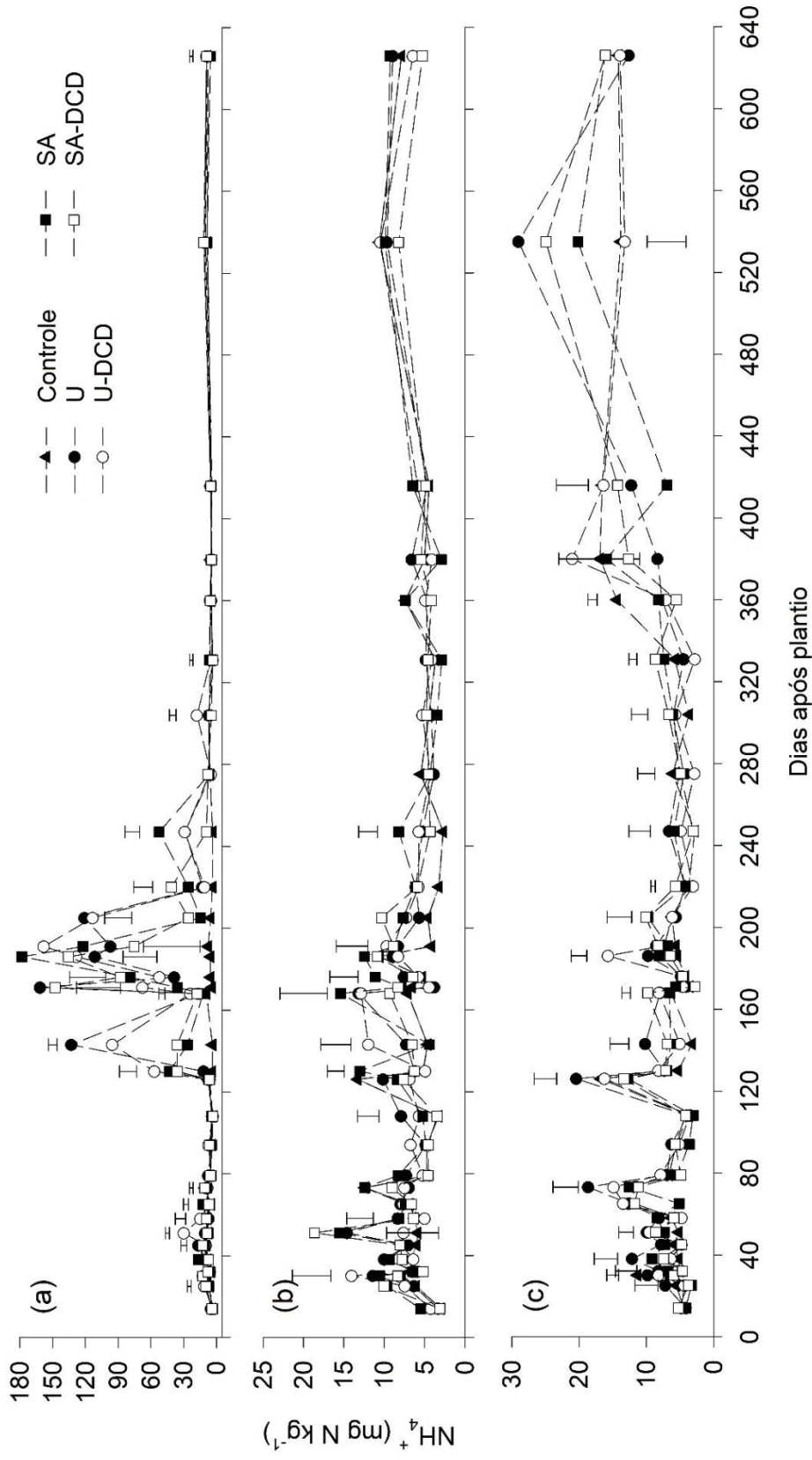
A concentração de amônio da camada 0-10 cm do solo adubado foi semelhante entre os tratamentos em ambas adubações (FIGURA 8a). O efeito da adubação de base sobre a concentração de amônio foi menor que a adubação de cobertura, refletindo em menor variação (3 a 30 mg N kg⁻¹). A adubação de cobertura promoveu aumento da concentração de amônio do solo em 8 vezes, atingindo valores acima de 90 mg N kg⁻¹ aos 143 DAP e entre 171 a 205 DAP e valores máximos de 178 mg N kg⁻¹ aos 186 DAP. Os valores médios de amônio do solo após adubação de cobertura foram 10 vezes maiores nos tratamentos adubados com nitrogênio do que no Controle (57 vs. 5 mg N kg⁻¹) e semelhantes entre si. O efeito da adubação de cobertura sobre a concentração de amônio se estendeu até 275 DAP. Após este período, as concentrações de amônio do solo dos tratamentos permaneceram basais (média de 7 mg N kg⁻¹).

A concentração de amônio do solo da linha de plantio variou de 3 a 19 mg N kg⁻¹ (FIGURA 8b), sendo que boa parte desta variação ocorreu até 275 DAP. Após este período, a concentração de amônio do solo manteve-se na média de 6 mg N kg⁻¹. A concentração de amônio do solo da entrelinha de plantio variou de 3 a 29 mg N kg⁻¹ (FIGURA 8c), ocorrendo menor variação no primeiro ano de cultivo (3 a 20 mg N kg⁻¹) e maiores valores no segundo ano de cultivo (12 a 29 mg N kg⁻¹).

A concentração de nitrato da camada 0-10 cm do solo adubado apresentou magnitude quatro vezes menor que a concentração de amônio (1 a 42 mg N kg⁻¹) e comportamento semelhante entre os tratamentos, (FIGURA 9a). Após a adubação de base, a concentração de nitrato manteve-se entre 1 e 15 mg N kg⁻¹. Após a adubação de cobertura, a magnitude aumentou em duas vezes. De modo geral, a amplitude da concentração de nitrato permaneceu entre 1 e 26 mg N kg⁻¹ até 304 DAP, exceto com a ocorrência de picos de 42 mg N kg⁻¹ aos 168 DAP. Após 304 DAP, a concentração de nitrato do solo manteve-se basal até o final do segundo ano de avaliação (média de 1 mg N kg⁻¹).

A linha de plantio apresentou concentrações de nitrato maiores que o solo da entrelinha de plantio (FIGURA 9b). A concentração de nitrato variou de 1 a 25 mg N kg⁻¹, de modo que essa amplitude ocorreu até 304 DAP. Após este período, a concentração de nitrato manteve-se na média de 1 mg N kg⁻¹ até o final do período de monitoramento. A concentração de nitrato do solo da entrelinha de plantio variou de 1 a 19 mg N kg⁻¹, sendo que essa amplitude ocorreu até 304 DAP (FIGURA 9c). Após este período, a concentração de nitrato manteve-se na média de 3 mg N kg⁻¹ até o final do segundo ano de avaliação.

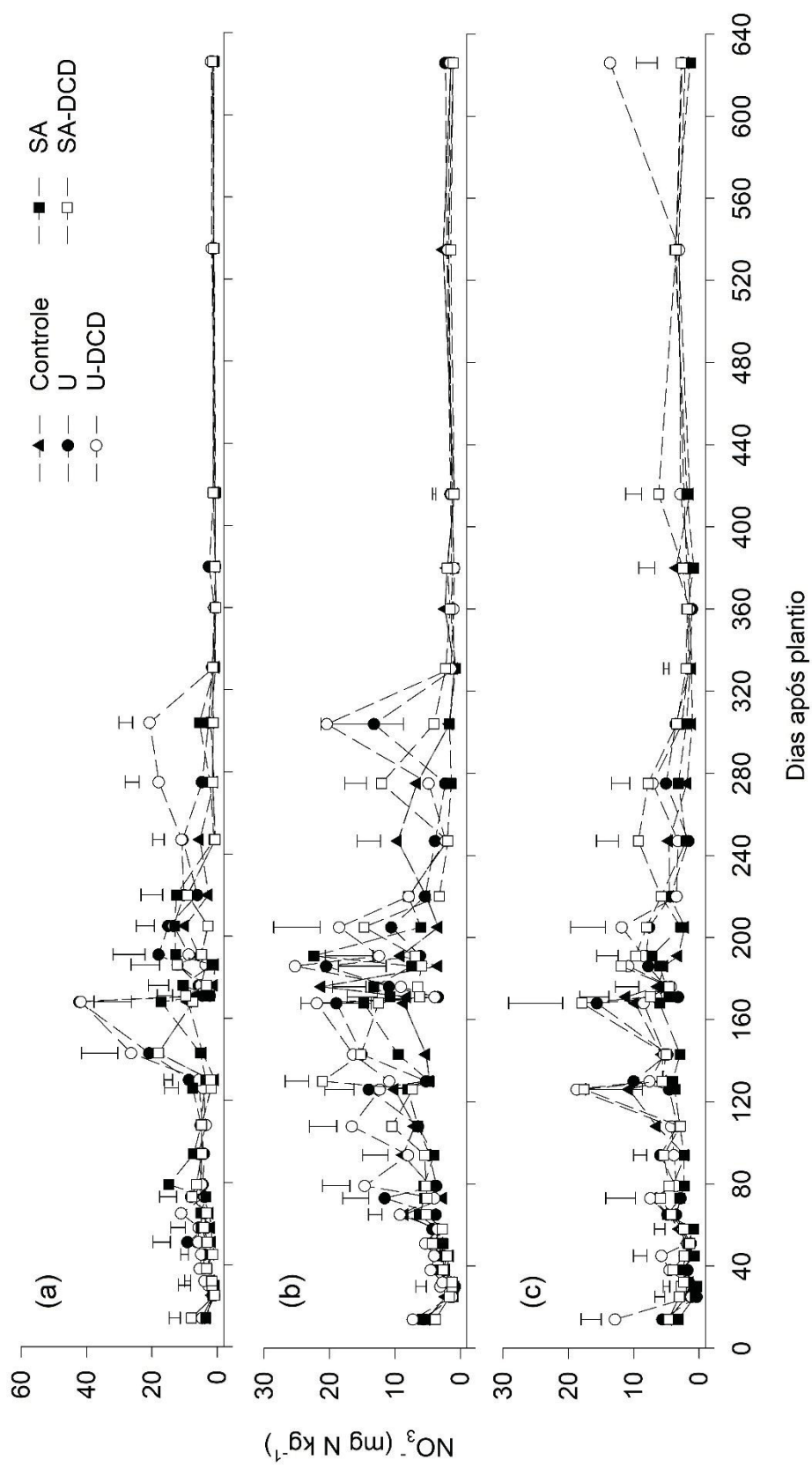
FIGURA 8 – CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO DA CAMADA 0-10 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO (a), DA LINHA (b) E DA ENTRELINHA (c) DE PLANTIO DE EUCALIPTO, SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

FIGURA 9 – CONCENTRAÇÃO DE NITRATO DE CAMADA 0-10 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO (a), DA LINHA (b) E DA ENTRELINHA (c) DE PLANTIO DE EUCALIPTO, SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÉMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

O solo adubado, da linha e da entrelinha de plantio apresentaram densidade, microporosidade e porosidade total semelhantes entre si, em média $0,92 \text{ kg dm}^{-3}$, $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente (TABELA 4). Porém, a macroporosidade do solo da entrelinha foi 32% menor que o solo adubado e da linha de plantio ($0,13$ vs. $0,19 \text{ m}^3$).

TABELA 4 - DENSIDADE DO SOLO, MACROPOROSIDADE, MICROPOROSIDADE E POROSIDADE TOTAL DA CAMADA 0-10 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO, DA LINHA E DA ENTRELINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO. TELÊMACO BORBA – PR, 2019.

| Local de amostragem | Densidade (kg dm^{-3}) | Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) | Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) | Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) |
|---------------------|-----------------------------------|---|---|--|
| Adubado | 0,84 a | 0,19 a | 0,32 a | 0,51 a |
| Linha | 0,93 a | 0,19 a | 0,32 a | 0,51 a |
| Entrelinha | 0,98 a | 0,13 b | 0,37 a | 0,50 a |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

3.5.3 Correlação entre fluxos de N_2O e as variáveis do solo

O fluxo de N_2O apresentou baixa correlação com as variáveis do solo (TABELA 5). As maiores correlações (entre 0,3 e 0,4) ocorreram no primeiro ano de cultivo do eucalipto. No solo adubado, o fluxo de N_2O apresentou correlação positiva com PPA (0,307) no período após adubação de base, e com temperatura (0,302) e concentração de amônio (0,312) no período após adubação de cobertura. No solo da linha, o fluxo de N_2O foi correlacionado positivamente com temperatura do solo (0,332) e PPA (0,406), enquanto que a maior correlação no solo da entrelinha ocorreu com a PPA (0,346).

TABELA 5 - CORRELAÇÃO DE PEARSON (R) E SIGNIFICÂNCIA (P) ENTRE FLUXO DE ÓXIDO NITROSO E TEMPERATURA (T), POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (PPA), CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO (NH₄⁺) E CONCENTRAÇÃO DE NITRATO (NO₃⁻) DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO, DA LINHA E DA ENTRELINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO EM DOIS ANOS DE AVALIAÇÃO. TELÊMACO BORBA - PR, 2018 E 2019.

| Ano de avaliação | Posições no plantio | Adubação | T | PPA | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | |
|------------------|---------------------|-----------|--------|--------|------------------------------|------------------------------|--------|
| 2018 | Solo adubado | Base | r | -0,237 | 0,307 | 0,203 | -0,213 |
| | | | P | 0,001 | 0,001 | 0,004 | 0,003 |
| | Solo linha | Cobertura | r | 0,302 | 0,021 | 0,312 | 0,176 |
| | | | P | 0,001 | 0,749 | 0,001 | 0,008 |
| | Solo entrelinha | | r | 0,332 | 0,406 | 0,181 | -0,215 |
| | | | P | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 2019 | Solo adubado | | r | 0,228 | 0,346 | 0,019 | -0,215 |
| | | | P | 0,001 | 0,001 | 0,703 | 0,001 |
| | Solo linha | | r | 0,022 | 0,141 | -0,120 | -0,075 |
| | | | P | 0,887 | 0,357 | 0,433 | 0,625 |
| | Solo entrelinha | | r | -0,092 | -0,096 | 0,113 | 0,223 |
| | | | P | 0,549 | 0,529 | 0,458 | 0,140 |
| Solo entrelinha | | r | -0,052 | -0,083 | 0,197 | -0,270 | |
| | | P | 0,735 | 0,589 | 0,196 | 0,072 | |

3.6.1 DISCUSSÃO

3.6.1 Adubação nitrogenada e efeito do inibidor de nitrificação

O maior efeito da adubação nitrogenada sobre os fluxos de N_2O do solo ocorreu após a adubação de base (FIGURA 2a). Neste período, os fluxos foram correlacionados com a PPA e com a concentração de amônio do solo (TABELA 5), indicativo de que a ocorrência de chuvas frequentes a partir de 15 DAP (FIGURA 5) pode ter aumentado a taxa de difusão de nitrogênio no solo e estimulado a nitrificação no solo (EATON, 2001). O processo de nitrificação foi considerado predominante neste estudo, visto que o intervalo de PPA durante os dois anos de avaliação se manteve entre 26 e 67% (FIGURA 7a) (BATEMAN e BAGGS, 2005), e que as condições físicas de boa drenagem e aeração do Latossolo são propícias para sua ocorrência (SOARES et al., 2016).

A menor emissão de N_2O no período após a adubação de cobertura (FIGURA 2a) pode estar relacionada à ausência de chuvas por 35 dias após a adubação de cobertura (FIGURA 5), condição que pode ter reduzido a atividade nitrificante no solo, pois apesar do incremento de amônio, os fluxos de N_2O do solo foram 10 vezes menores que os observados após a adubação de base (FIGURA 2a). Embora os valores de PPA tenham se mantido na média de 39% após a adubação de cobertura (FIGURA 7a), a condição prolongada sem chuva pode ter limitado a atividade dos microrganismos nitrificantes. Em condições de seca sob pastagem, Hartmann et al. (2013) observaram que a redução da taxa de nitrificação foi decorrente do estresse hídrico sobre a atividade dos microrganismos e não sobre sua população.

De modo geral, a adubação nitrogenada do eucalipto com as fontes convencionais ureia e sulfato de amônio aumentou a emissão de N_2O do solo no primeiro ano de cultivo em três vezes em relação ao solo não adubado (TABELA 2). Já a combinação do DCD às fontes reduziu a emissão de N_2O do solo em 54% (TABELA 2), concordando com o relatado para Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar no Brasil (49%, SOARES et al., 2015) e ao intervalo que é relatado para solos agrícolas do mundo (37 a 74%, AKIYAMA et al., 2010).

O DCD atua bloqueando o sítio ativo da enzima amônia monooxigenase, inibindo sua função em oxidar amônio e refletindo em menor taxa de nitrificação e emissão de N_2O através deste processo (CAMERON et al., 2013). A inibição do processo de nitrificação pode reduzir a população de microrganismos nitrificantes no solo (AARNIO E MARTIKAINEN, 1992; BARTH et al., 2020), porém, seu principal

efeito geralmente reflete em maior concentração de amônio e menor concentração de nitrato por mais tempo no solo, como foi observado claramente no capítulo 1 e por Wang et al. (2017) em solo agrícola. Contudo, este efeito não foi observado neste estudo (FIGURAS 8a, 9a), embora os fluxos dos tratamentos U-DCD e SA-DCD permaneceram menores que as fontes convencionais na maioria dos eventos de amostragem de ar (FIGURA 2a).

A ausência de efeito claro do DCD sobre as concentrações de amônio e nitrato do solo pode estar relacionada à forma de aplicação do fertilizante, à forma de coleta do solo, e/ou às condições climáticas em cada adubação. Na adubação de base, a aplicação localizada do fertilizante em covetas pode ter limitado espacialmente a difusão de nitrogênio no solo, como observado por Jiang et al. (2017), que relatam distância máxima de difusão da ureia no solo de 9 cm, em condições de aplicação localizada à 12 cm de profundidade. Aliado a isso, a coleta de solo em local intermediário entre solo adubado e não adubado pode ter contribuído para que as reais concentrações de amônio e nitrato do solo fossem subestimadas, não demonstrando o efeito do DCD sobre estas variáveis.

Na adubação de cobertura, com a aplicação do fertilizante sobre a superfície do solo, a ausência de chuvas e temperatura variando entre 20 e 25 °C nos primeiros 25 dias após adubação (FIGURA 5) podem ter reduzido a eficiência do DCD no solo, refletindo em concentrações de amônio e nitrato semelhantes às fontes convencionais (FIGURAS 8a, 9a). Possivelmente, o inibidor ficou mais suscetível à degradação quando exposto na superfície do solo, enquanto que a ausência de chuvas limitou sua difusão no solo e a temperatura aumentou sua taxa de degradação. Estudos relatam que a meia vida do DCD diminui em condições de elevada temperatura (KELLIHER et al., 2008), podendo reduzir em até 79% quando submetido ao intervalo de 5 a 25 °C em solos agrícolas do Reino Unido (MCGEOUGH et al., 2016).

Apesar do DCD não ter apresentado efeito claro sobre as concentrações de amônio e nitrato do solo, seu potencial em reduzir a emissão de N₂O foi observado nos valores de FE obtidos no primeiro ano de avaliação, independentemente da fonte convencional avaliada (TABELA 2). Os tratamentos com inibidor de nitrificação apresentaram FE médio de 0,04%, valor consideravelmente menor que o 1% estabelecido pelo IPCC para inventários de emissões e remoções de GEE (IPCC, 2006). As fontes convencionais ureia e sulfato de amônio também apresentaram FE baixos (média de 0,24%), coincidindo com o FE obtido em sistema

silvipastoril com angico-vermelho adubado com ureia no Pampa gaúcho (0,26%, Ferreto, 2015). Apesar do resultado positivo, é importante considerar os dados com cautela, pois o FE da adubação de cobertura contribuiu com 72% para o cálculo do FE total, sendo que neste período as menores emissões de N₂O do solo coincidiram com ausência de chuvas. Sendo assim, torna-se necessário avaliar a emissão de N₂O do solo a partir de adubações nitrogenadas realizadas em outras épocas do ano, para então definir o real FE dos tratamentos avaliados.

3.6.2 Efeito das posições no plantio

A emissão de N₂O do solo das posições no plantio avaliadas apresentaram comportamento diferenciado entre si e entre os dois anos de monitoramento (Emissão não ponderada, TABELA 3). No primeiro ano de cultivo do eucalipto, o solo adubado apresentou emissão de N₂O 43% maior que o solo da linha e 59% maior que o solo da entrelinha, comportamento relacionado à maior concentração de nitrogênio mineral. Neste estudo, o solo adubado apresentou concentrações de amônio (FIGURA 8) e nitrato (FIGURA 9) nove e duas vezes maiores, respectivamente, que o solo da linha de plantio, posição que apresentou mesma condição de manejo, porém sem adubação nitrogenada. Assim, a presença de nitrogênio no solo possivelmente estimulou a atividade dos microrganismos nitrificantes e desnitrificantes, refletindo em maiores emissões de N₂O, assim como observado em solos florestais submetidos à adubação nitrogenada (SZUKICS et al., 2009; LI et al., 2019).

O solo da linha, por sua vez, apresentou emissão de N₂O 11% maior que o solo da entrelinha de plantio, e essa pequena diferença pode estar relacionada à maior taxa de nitrificação. Este processo foi considerado predominante nesta posição porque a PPA manteve-se em intervalo de 26 a 67% (FIGURA 7b) e o volume de macroporos foi 32% maior que o solo da entrelinha de plantio (TABELA 4), condições propícias à ocorrência do processo de nitrificação (BATEMAN e BAGGS, 2005; SAHRAWAT, 2008). Aliada às condições de aeração, a maior oscilação de temperatura do solo da linha (FIGURA 6b) pode ter incrementando a atividade nitrificante e emissão de N₂O do solo, como também observado em solos florestais em períodos quentes (SHRESTHA et al., 2014; YIN et al., 2016). Estes fatores possivelmente contribuíram para que o solo da linha apresentasse maior número de eventos de amostragem com concentração de nitrato acima de 10 mg N kg⁻¹ (FIGURA

9b), quando comparado ao solo da entrelinha de plantio (FIGURA 9c), indicativo de maior taxa de nitrificação.

Por outro lado, a menor concentração de nitrato no solo da entrelinha (FIGURA 9c) refletem em menor taxa de nitrificação. Nesta posição, a hipótese é que a emissão de N₂O ocorreu predominantemente pelo processo de desnitrificação, pois os maiores fluxos de N₂O do solo (15 a 94 DAP) (FIGURA 4a) coincidiram com elevados valores de PPA (FIGURA 7c). Embora os valores de PPA tenham variado entre 34 e 96% neste período, o menor volume de macroporos do solo da entrelinha (TABELA 4) possivelmente promoveu condições de anaerobiose favoráveis à ocorrência da desnitrificação, pois maior proporção dos macroporos foram preenchidos por água em uma mesma condição de umidade que o solo das demais posições no plantio. Este mesmo comportamento também foi observado por Teepe et al. (2002) após o tráfego de máquinas na colheita de faia (*Fagus sylvatica*). Contudo no presente estudo, não é possível determinar se o tráfego de máquinas promoveu a redução do volume de macroporos do solo da entrelinha ou se a subsolagem aumentou o volume de macroporos da linha de plantio.

Apesar do primeiro ano de cultivo do eucalipto ter apresentado diferentes comportamentos de emissão de N₂O do solo entre as posições no plantio, o segundo ano foi caracterizado por emissões semelhantes (Emissão não ponderada, TABELA 3) e cerca de 13 vezes menor que o primeiro ano de avaliação (Emissão não ponderada, TABELA 3). Este resultado indica estabilização da emissão de N₂O e pode estar relacionado ao desenvolvimento do povoamento. Neste estudo, o eucalipto cresceu rapidamente, de modo que as árvores possuíam altura de 5 metros no início do segundo ano de avaliação (dados não apresentados), e possivelmente, o maior sombreamento pela copa diminuiu a oscilação de temperatura do solo das posições no plantio (FIGURA 6).

Além da parte aérea, o volume de solo explorado pelas raízes do eucalipto também aumenta com a idade (LACLAU et al., 2013), assim como sua capacidade em absorver água. Silva et al. (2020) observaram que a capacidade de absorção de água de povoamentos de eucalipto com nove meses de idade já é semelhante a plantios de até cinco anos. Neste sentido, as plantas com 1 ano avaliadas no segundo ano de monitoramento também podem ter apresentado elevada capacidade de absorção de água, reduzindo a oscilação da PPA das posições no plantio no segundo ano de avaliação (FIGURA 7).

O maior volume de solo explorado pelas raízes do eucalipto também pode ter aumentado a taxa de absorção de nitrogênio. Durante o segundo ano de monitoramento, elevada quantidade de massa seca de folhas foram aportadas ao solo, ocorrendo acúmulo de 800 kg ha⁻¹ aos 15 meses de idade e aporte mensal de 200 kg ha⁻¹ aos 23 meses (dados não apresentados). Estes valores correspondem ao acúmulo de cerca de 21 kg N ha⁻¹ e aporte mensal de 5 kg N ha⁻¹, considerando concentração de nitrogênio foliar de 2,68% (dados não apresentados). Apesar do potencial aporte de nitrogênio ao solo pela serapilheira, as concentrações de amônio e nitrato das posições no plantio avaliadas permaneceram basais no segundo ano de monitoramento (FIGURAS 8, 9), indicativo de elevada eficiência de absorção do nitrogênio pelo eucalipto. Neste sentido, a menor concentração de nitrogênio mineral do solo e a menor oscilação de temperatura e PPA do solo com o desenvolvimento do eucalipto constituem menor substrato e condições ambientais estáveis, respectivamente, para a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação, refletindo em fluxos de N₂O basais, assim como observado no segundo ano de avaliação neste estudo.

3.7 CONCLUSÕES

O uso do inibidor de nitrificação dicianodiamida com ureia ou sulfato de amônio apresentou potencial de mitigação da emissão de óxido nitroso do solo cultivado com eucalipto, reduzindo a emissão do solo adubado e total do povoamento em 54 e 16%, respectivamente, quando comparado às fontes nitrogenadas convencionais.

O efeito da adubação nitrogenada sobre a emissão de óxido nitroso do solo adubado foi observado somente no primeiro ano de cultivo do eucalipto, sendo maior neste local, seguido do solo da linha e da entrelinha de plantio. O efeito das posições no plantio sobre a emissão de óxido nitroso do solo foi observado somente no primeiro ano de avaliação, assemelhando-se no segundo ano de cultivo do eucalipto. Os resultados obtidos em povoamento de eucalipto na Região Sul do Brasil sugerem a importância de considerar as posições de solo no plantio para a estimativa correta da emissão de óxido nitroso total do povoamento, principalmente no período inicial após o estabelecimento da cultura.

3.8 REFERÊNCIAS

AARNIO, T.; MARTIKAINEN, P. J. Nitrification in forest soil after refertilization with urea or urea and dicyandiamide. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 24, p. 951-954, 1992.

AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O e NO emissions from agricultural soil: meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1837-1846, 2010.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* v. 22, p. 711-728, 2013.

BANERJEE, B.; PATHAK, H.; AGGARWAL, P. K. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, p. 207-214, 2002.

BARTH, G.; OTTO, R.; ALMEIDA, R. F.; CARDOSO, E. J. B. N.; CANTARELLA, H.; VITTI, G. C. Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor. **Scientia Agricola**, v. 77, p. 1-5, 2020.

BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, p. 379-388, 2005.

BLUMFIELD, T. J.; XU, Z. H. Impact of harvest residues on soil mineral nitrogen dynamics following clearfall harvesting of a hoop pine plantation in subtropical Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 55-67, 2003.

CAMERON, K. C.; DI, H. J.; MOIR, J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, p. 145-173, 2013.

CARTER, M. C.; DEAN, T. J.; ZHOU, M.; MESSINA, M. G.; WANG, Z. Short-term changes in soil C, N, and biota following harvesting and regeneration of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Forest Ecology and Management**, v. 164, p. 67-88, 2002.

CECHIN, N. F. Compactação de dois Argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. The use of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), to decrease nitrate leaching and nitrous oxide emissions in a simulated grazed and irrigated grassland. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 395-403, 2002.

EATON, W. D. Microbial and nutrient activity in soils from three different subtropical Forest habitats in Belize, Central America before and during transition from dry and wet season. **Applied Soil Ecology**, v. 16, p. 219-227, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 1997.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). International online conference on the economics of climate change mitigation options in the forest sector: summary report. Rome: FAO, 2015.

FERRETO, D. O. C. Fluxo de óxido nitroso e metano em solo sob implantação de um sistema silvipastoril com *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan em campo nativo [dissertação]. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Pampa, São Gabriel, 2015.

FIALHO, R. C.; TEIXEIRA, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; SILVA, I. R. Short-term carbon emissions: effects of various tree harvesting, transport, and tillage methods under a eucalyptus plantation. **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 3995-4004, 2018.

GILSANZ, C.; BÁEZ, D.; MISSELBROOK, T. H.; DHANOA, M. S.; CÁRDENAS, L. M. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 1-8, 2016.

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis. 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [a]

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput). 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [b]

HARTMANN, A. A.; BARNARD, R. L. Effects of drought and N-fertilization on N cycling in two grassland soils. **Oecologia**, v. 171, p. 705-717, 2013.

IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). Relatório 2019. IBÁ, 2019.

IBARR, M. A. Estoque de carbono e fluxos de óxido nitroso e metano do solo em plantios de pinus e floresta nativa. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciência Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate Change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (editors). Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, p. 1-1535.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). N₂O emissions from managed soil, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (editors). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

JIANG, C.; WANG, H.; LU, D.; ZHOU, J.; LI, D.; ZU, C. Effects of Fertilizer Placement and nitrogen forms of soil nitrogen diffusion and migration of Red-Yellow soil in China. **Agricultural Sciences**, v. 8, p. 1227-1238, 2017.

KELLIHER, F. M.; CLOUGH, T. J.; CLARK, H.; RYS, G.; SEDCOLE, J. R. The temperature dependence of dicyandiamide (DCD) degradation in soils: a data synthesis. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 40, p. 1878-1882, 2008.

LACLAU, J.; SILVA, E. A.; LAMBAIS, G. R.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J.; GONÇALVES, J. L. M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-12, 2013.

LI, D.; LIU, Q.; YIN, H. LUO, Y.; HUI, D. Differential responses and controls of soil CO₂ and N₂O fluxes to experimental warming and nitrogen fertilization in subalpine coniferous spruce (*Picea asperata* Mast.) plantation forest. **Forests**, v.10, p. 1-16, 2019.

LIVESLEY, S. J.; KIESE, R.; MIEHLE, P.; WESTON, C. J.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ARNDT, S. K. Soil-atmosphere Exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. **Global Change Biology**, v. 15, p. 425-440, 2009.

MCGEOUGH, K. L.; WATSON, C. J.; MULLER, C.; LAUGHLIN, R. J.; CHADWICK, D. R. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 94, p. 222-232, 2016.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019.

RAZA S.; CHEN Z.; AHMED, M.; AFZAL M. R.; AZIZ, T.; ZHOU, J. Dicyandiamide application improved nitrogen use efficiency and decreased nitrogen losses in wheat-

maize crop rotation in Loess Plateau. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, p. 450-464, 2019.

SAHRAWAT, K. L. Factors affecting nitrification in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 1436-1446, 2008.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R. A., ALMEIDA, J. A., CUNHA, T. J. F., OLIVEIRA, J. B., Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. Brasília, Embrapa, 2013.

SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. Porto Alegre: SBCS, 2004.

SHRESTHA, R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems. **New Forests**, v. 46, p. 167-193, 2015.

SHRESTHA , R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B.; HOLUB, S. M.; MEEHAN, N. Fertilizer management, parent material, and stand age influence forest soil greenhouse gas fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 2041-2053, 2014.

SILVA, V. E.; NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; HE, Z.; BUZETTI, S.; LACLAU, J.; FILHO, M. C. M. T.; GRILLI, E.; MURGIA, I.; CAPRA, G. F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 2020.

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, p. 423-430, 2015.

SOARES, J. R.; CASSMAN, N. A.; KIELAK, A. M.; PIJL, A.; CARMO, J. B.; LOURENÇO, K. S.; LAANBROEK, H. J.; CANTARELLA, H.; KURUMAE, E. E. Nitrous

oxide emission related to ammonia-oxidizing bacteria and mitigation options from N fertilization in a tropical soil. **Nature**, v. 6, p. 1-11, 2016.

STRÖMGREN, M.; HEDWALL, P. –O.; OLSSON, B. A. Effects of stump harvest and site preparation on N₂O and CH₄ emissions from boreal forest soil after clear-cutting. **Forest Ecology and Management**, v. 371, p. 15-22, 2016.

SZUKICS, U.; HACKL, E.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; SESSITSCH, A. Contrasting response of two forest soils to nitrogen input: rapidly altered NO and N₂O emissions and *nirK* abundance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 45, p. 855-863, 2009.

TASSINARI, D.; ANDRADE, M. L. C.; JUNIOR, M. S. D.; MARTINS, R. P.; ROCHA, W. W.; PAIS, P. S. M.; SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvesting, skidding and wood processing in eucalyptus forests on coarse-textured tropical soils. **Soil Use and Management**, v. 35, p. 400-411, 2019.

TEEPE, R.; BRUMME, R.; BEESE, F.; LUDWIG, B. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 605-611, 2002.

TIAN, Z.; WANG, J. J.; LIU, S.; ZHANG, Z.; DODLA, S. K.; MYERS, G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of the Total Environment**, v. 533, p. 329-338, 2015.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide. **Annals of Forest Science**, v. 76, 2019.

VILSMEIER, K.; BORNEMISZA, E.; AMBERGER, A. Urea, ammonium sulfate and dicyandiamide transformations in Costan Rican soils. **Fertilizer Research**, v. 12, p. 255-261, 1987.

WANG, Q.; HU, H.; SHEN, J.; DU, S.; ZHANG, L.; HE, J.; HAN, L. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) in N₂O emissions and the abundance of nitrifiers and denitrifiers in two contrasting agricultural soil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 1635-1643, 2017.

WANG, Y.; CHENG, S.; FANG, H.; YU, G.; XU, M.; DANG, X.; LI, L.; WANG, L. Simulated nitrogen deposition reduces CH₄ uptake and increases N₂O emission from a Subtropical plantation forest soil in Southern China. **Plos One**, v. 9, p. 1-10, 2014.

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FERREIRA FILHO, P. J.; POGETTO, M. H. F. A. D. Guia prático de manejo de plantações de eucalipto. Botucatu: FEPAF, 2008.

WREGE, M. S., STEINMETZ, S., JÚNIOR, C. R., ALMEIDA, I. R. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Technical report. Brasília: Embrapa, 2012.

YIN, S.; ZHANG, X.; PUMPANEN, J.; SHEN, G.; XIONG, F.; LIU, C. Seasonal variation in soil greenhouse gas emissions at three age-stages of dawn redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) stands in an alluvial island, Eastern China. **Forests**, v. 7, p. 1-15, 2016.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. S.; CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. 1. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

ZHANG, K.; ZHENG, H.; CHEN, F.; LI, R.; YANG, M.; OUYANG, Z. Impact of nitrogen fertilization on soil-atmosphere greenhouse gas exchanges in eucalypt plantations with different soil characteristics in southern China. **Plos One**, v. 12 p. 1-14.

4 CONCLUSÃO GERAL

Dois estudos foram realizados nesta tese, sendo o primeiro capítulo realizado em casa de vegetação e o segundo em condições de campo. Nas condições controladas de casa de vegetação, observou-se que a adubação nitrogenada do eucalipto com ureia ou sulfato de amônio com inibidor de nitrificação dicianodiamida constituiu a melhor alternativa para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa, reduzindo a emissão de óxido nitroso em mais de 95% e promovendo menor efeito inibitório no consumo de metano em relação às fontes convencionais. Os tratamentos também mantiveram a concentração de amônio maior por mais tempo no solo, estimulando a absorção de nitrogênio pelas mudas de eucalipto. Por outro lado, os fertilizantes em polímeros e a combinação de NBPT à ureia não apresentaram potencial de mitigação da emissão de gases de efeito estufa, mantendo as emissões de óxido nitroso e metano do solo semelhantes às fontes convencionais, bem como para a eficiência de uso do nitrogênio pelo eucalipto.

As fontes ureia e sulfato de amônio com dicianodiamida também foram testadas em condições de campo e apresentaram potencial em reduzir a emissão de óxido nitroso do solo, atingindo valores 54% menores que os encontrados nas fontes convencionais, bem como contribuíram para a redução de 16% da emissão total do povoamento no primeiro ano de cultivo do eucalipto. O solo adubado no campo apresentou maior emissão de óxido nitroso, seguido do solo da linha e da entrelinha de plantio. O efeito das posições no plantio sobre a emissão de óxido nitroso do solo ocorreu somente no primeiro ano de avaliação, mantendo-se semelhante no segundo ano de cultivo do eucalipto. Estes resultados sugerem a importância de considerar as posições de solo no plantio, principalmente no período inicial de cultivo, a fim de estimar corretamente a emissão de óxido nitroso total do povoamento.

5 REFERÊNCIAS

AARNIO, T.; MARTIKAINEN, P. J. Nitrification in forest soil after refertilization with urea or urea and dicyandiamide. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 24, p. 951-954, 1992.

AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O e NO emissions from agricultural soil: meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 16, p. 1837-1846, 2010.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* v. 22, p. 711-728, 2013.

BANERJEE, B.; PATHAK, H.; AGGARWAL, P. K. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, p. 207-214, 2002.

BARTH, G.; OTTO, R.; ALMEIDA, R. F.; CARDOSO, E. J. B. N.; CANTARELLA, H.; VITTI, G. C. Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor. **Scientia Agricola**, v. 77, p. 1-5, 2020.

BASSACO, M. V. M.; MOTTA, A. C. V.; PAULETTI, V.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; FERREIRA, C. F. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v. 49, p. 681-697, 2018.

BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, p. 379-388, 2005.

BLUMFIELD, T. J.; XU, Z. H. Impact of harvest residues on soil mineral nitrogen dynamics following clearfall harvesting of a hoop pine plantation in subtropical Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 55-67, 2003.

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

CAMERON, K. C.; DI, H. J.; MOIR, J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, p. 145–173, 2013.

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018.

CARTER, M. C.; DEAN, T. J.; ZHOU, M.; MESSINA, M. G.; WANG, Z. Short-term changes in soil C, N, and biota following harvesting and regeneration of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Forest Ecology and Management**, v. 164, p. 67-88, 2002.

CECHIN, N. F. Compactação de dois Argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 120, p. 267-322, 2009.

CHRISTIANSON, C. B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea. **Fertilizer Research**, v. 16, p. 273-284, 1988.

CLAYTON, H.; MCTAGGART, I. P.; PARKER, J.; SWAN, L.; SMITH, K. A. Nitrous oxide emissions from fertilized grassland: a 2-year study of the effects of N fertiliser form and environmental conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 25, p. 252-260, 1997.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. The use of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), to decrease nitrate leaching and nitrous oxide emissions in a simulated grazed and irrigated grassland. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 395-403, 2002.

DING, W. X.; CHEN, Z. M.; YU, H. Y.; LUO, J. F.; YOO, G. Y.; XIANG, J.; ZHANG, H. J.; YUAN, J. J. Nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency in response to nitrophosphate, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide of wheat cultivated soil under sub-humid monsoon conditions. **Biogeosciences**, v. 12, p. 803-815, 2015.

EATON, W. D. Microbial and nutrient activity in soils from three different subtropical Forest habitats in Belize, Central America before and during transition from dry and wet season. **Applied Soil Ecology**, v. 16, p. 219-227, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 1997.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). International online conference on the economics of climate change mitigation options in the forest sector: summary report. Rome: FAO, 2015.

FERREIRA, J. M. A.; STAPE, J. L. Productivity gains by fertilization in *Eucalyptus urophylla* clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests**, v. 71, p. 253-258, 2009.

FERRETO, D. O. C. Fluxo de óxido nitroso e metano em solo sob implantação de um sistema silvipastoril com *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan em campo nativo [dissertação]. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Pampa, São Gabriel, 2015.

FIALHO, R. C.; TEIXEIRA, R. S.; TEIXEIRA, A. P. M.; SILVA, I. R. Short-term carbon emissions: effects of various tree harvesting, transport, and tillage methods under a eucalyptus plantation. **Land Degradation & Development**, v. 29, p. 3995-4004, 2018.

FORRESTAL, P. J.; HARTY, M.; CAROLAN, R.; LANIGAN, G. J.; WATSON, C. J.; LAUGHLIN, R. J.; MCNEILL, G.; CHAMBERS, B. J.; RICHARDS, K. G. Ammonia emissions from urea, stabilized urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss

abatement in temperate grassland. **Soil Use and Management**, v. 32, p. 92–100, 2016.

GARNETT, T. P.; SMETHRUST, P. J. Ammonium and nitrate uptake by *Eucalyptus nitens*: effects of pH and temperature. **Plant and Soil**, v. 214, p. 133-140, 1999.

GENG, J.; CHENG, S.; FANF, H.; YU, G.; LI, X.; SI, G.; HE, S.; YU, G.; Soil nitrate accumulation explains the nonlinear responses of soil CO₂ and CH₄ fluxes to nitrogen addition in a temperate needle-broadleaved mixed forest. **Ecological Indicators**, v. 79; p. 28-36, 2017.

GILSANZ, C.; BÁEZ, D.; MISSELBROOK, T. H.; DHANOA, M. S.; CÁRDENAS, L. M. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 216, p. 1-8, 2016.

GOLDEN, B.; SLATON, N.; NORMAN, R.; GBUR, E.; WILSON, C. Nitrogen release from environmentally smart nitrogen fertilizer as influenced by soil series, temperature, moisture, and incubation method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 1809-1824, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 45-61, 2004.

GREGORICH, E.; JANZEN, H. H.; HELGASON, B.; ELLERT, B. Nitrogenous gas emissions from soil and greenhouse gas effects. **Advances in Agronomy**, v. 132, p. 39-74, 2015.

HALVORSON, A. D.; SNYDER, C. S.; BLAYLOCK, A. D.; DEL GROSSO, S. J. Enhanced-efficiency nitrogen fertilizer: potential role in nitrous oxide emission mitigation. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 715-722, 2014.

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis. 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [a]

HAMBRIDGE, J. QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput). 1. Loveland: Lachat Instruments, 2007. [b]

HARTMANN, A. A.; BARNARD, R. L. Effects of drought and N-fertilization on N cycling in two grassland soils. **Oecologia**, v. 171, p. 705-717, 2013.

HINTON, N. J.; CLOY, J. M.; BELL, M. J.; CHADWICK, D. R.; TOPP, C. F. E.; REES, R. M. Managing fertiliser nitrogen to reduce nitrous oxide emissions and emission intensities from a cultivated Cambisol in Scotland. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 55-65, 2015.

HOU, A. X.; TSURUTA, H. Nitrous oxide and nitric fluxes from an upland Field in Japan: effect of urea type, placement and crop residues. **Nutrient Cycles in Agroecosystems**, v. 65, p. 191-200, 2003.

HÜTSCH, B. W. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, p. 27-35, 1998.

IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). Relatório 2019. IBÁ, 2019.

IBARR, M. A. Estoque de carbono e fluxos de óxido nitroso e metano do solo em plantios de pinus e floresta nativa. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciência Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Climate Change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (editors). Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, p. 1-1535.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). N₂O emissions from managed soil, and CO₂ emissions from lime and urea application. In:

EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (editors). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

JIANG, C.; WANG, H.; LU, D.; ZHOU, J.; LI, D.; ZU, C. Effects of Fertilizer Placement and nitrogen forms of soil nitrogen diffusion and migration of Red-Yellow soil in China. **Agricultural Sciences**, v. 8, p. 1227-1238, 2017.

KELLIHER, F. M.; CLOUGH, T. J.; CLARK, H.; RYS, G.; SEDCOLE, J. R. The temperature dependence of dicyandiamide (DCD) degradation in soils: a data synthesis. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 40, p. 1878-1882, 2008.

KHALIL, M. I.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Effects of urease and nitrification inhibitors added to urea on nitrous oxide emissions from a loess soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, p. 651-660, 2009.

LACLAU, J.; SILVA, E. A.; LAMBAIS, G. R.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J.; GONÇALVES, J. L. M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 1-12, 2013.

LI, D.; LIU, Q.; YIN, H. LUO, Y.; HUI, D. Differential responses and controls of soil CO₂ and N₂O fluxes to experimental warming and nitrogen fertilization in subalpine coniferous spruce (*Picea asperata* Mast.) plantation forest. **Forests**, v.10, p. 1-16, 2019.

LIVESLEY, S. J.; KIESE, R.; MIEHLE, P.; WESTON, C. J.; BUTTERBACH-BAHL, K.; ARNDT, S. K. Soil-atmosphere Exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. **Global Change Biology**, v. 15, p. 425-440, 2009.

LIU, S.; WANG, J. J.; TIAN, Z.; WANG, X.; HARRISON, S. Ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical wheat field under different nitrogen fertilization strategies. **Journal of Environmental Sciences**, v. 57, p.196-210, 2017.

MARTIKAINEN, P. J. Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate and potassium sulphate. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, p. 363-367, 1985.

MCGEOUGH, K. L.; WATSON, C. J.; MULLER, C.; LAUGHLIN, R. J.; CHADWICK, D. R. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 94, p. 222-232, 2016.

MELLO, F. A. F.; POSSÍDIO, E. L.; PEREIRA J. R.; ARAÚJO, J. P.; ABRAMOF, L.; COSTA, O. A. Efeito da adição de ureia e sulfato de amônio sobre o pH e nitrificação em um solo ácido. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 37, p. 1-10, 1980.

MOCHIZUKI, Y.; KOBAYASHI, K.; YOH, M. Strong inhibitory effect of nitrate on atmospheric methane oxidation in forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 50, p. 164-166, 2012.

MOJEREMANE, W.; REES, R. M.; MENCUCCINI, M. The effects of site preparation practices on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a peaty gley soil. **Forestry**, v. 19, p. 1-15, 2012.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, v. 225, p. 109–120, 2016.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 212, p. 283-289, 2016.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. 2. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019.

PENG, Y.; WANG, G.; LI, F.; YANG, G.; FANG, H.; LIU, L.; QIN, S.; ZHANG, D.; ZHOU, G.; FANG, H.; LIU X.; LIU, C.; YANG, Y. Unimodal response of soil methane consumption to increasing nitrogen additions. **Environmental Science & Technology**, v. 53, p. 4150-4160, 2019.

PFAUTSCH, S.; RENNENBERG, H.; BELL, T. L.; ADAMS, M. A. Nitrogen uptake by *Eucalyptus regnans* and *Acacia* spp. – preferences resource overlap and energetic costs. **Tree Physiology**, v. 29, p. 389-399, 2009.

PULITO, A. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SMETHURST, P. J.; JUNIOR, J. C. A.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; HUBNER, A.; MORAES, L. F.; MIRANDA, A. C.; KAMOGAWA, M. Y.; GAVA, J. L.; CHAVES, R.; SILVA, C. R. Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in Brazilian eucalypt plantations on soils contrasting texture. **Forests**, v. 6, p. 973-991, 2015.

RAYMOND, J. E.; FOX, T. R.; STRAHM, B. D. Understanding the fate of applied nitrogen in pine plantations of the Southeastern United States Using ¹⁵N enriched fertilizers. **Forests**, v. 7, p. 1-15, 2016.

RAZA S.; CHEN Z.; AHMED, M.; AFZAL M. R.; AZIZ, T.; ZHOU, J. Dicyandiamide application improved nitrogen use efficiency and decreased nitrogen losses in wheat-maize crop rotation in Loess Plateau. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, p. 450-464, 2019.

RIBEIRO, R. H.; BESEN, M. R.; SIMON, P. L.; BAYER, C.; PIVA, J. T. Enhanced-efficiency nitrogen fertilisers reduce winter losses of nitrous oxide, but not of ammonia, from no-till soil in a subtropical agroecosystem. **Soil Use and Management**, 2020.

ROCHE, L.; FORRESTAL, P. J.; LANIGAN, G. J.; RICHARDS, K. G.; SHAW, L. J.; WALL, D. P. Impact of fertilizer nitrogen formulation, and N stabilisers on nitrous oxide

emissions in spring barley. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 233, p. 229-237, 2016.

SAHRAWAT, K. L. Factors affecting nitrification in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 1436-1446, 2008.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R. A., ALMEIDA, J. A., CUNHA, T. J. F., OLIVEIRA, J. B., Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. Brasília, Embrapa, 2013.

SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. Porto Alegre: SBCS, 2004.

SHRESTHA, R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems. **New Forests**, v. 46, p. 167-193, 2015.

SHRESTHA , R. K.; STRAHM, B. D.; SUCRE, E. B.; HOLUB, S. M.; MEEHAN, N. Fertilizer management, parent material, and stand age influence forest soil greenhouse gas fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 2041-2053, 2014.

SILVA, V. E.; NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; HE, Z.; BUZETTI, S.; LACLAU, J.; FILHO, M. C. M. T.; GRILLI, E.; MURGIA, I.; CAPRA, G. F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 2020.

SINGH, J.; KUNHIKRISHNAN, A.; BOLAN, N. S.; SAGGAR, S. Impact of urease inhibitor and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine. **Science of the total environment**, v. 465, p. 56-63, 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, p. 423-430, 2015.

SOARES, J. R.; CASSMAN, N. A.; KIELAK, A. M.; PIJL, A.; CARMO, J. B.; LOURENÇO, K. S.; LAANBROEK, H. J.; CANTARELLA, H.; KURUMAE, E. E. Nitrous oxide emission related to ammonia-oxidizing bacteria and mitigation options from N fertilization in a tropical soil. **Nature**, v. 6, p. 1-11, 2016.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (editores). Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 205-274.

STRÖMGREN, M.; HEDWALL, P. -O.; OLSSON, B. A. Effects of stump harvest and site preparation on N₂O and CH₄ emissions from boreal forest soil after clear-cutting. **Forest Ecology and Management**, v. 371, p. 15-22, 2016.

SUGAMOSTO, M. L. Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do Canguiri, município de Pinhais – Paraná. 149 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SZUKICS, U.; HACKL, E.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; SESSITSCH, A. Contrasting response of two forest soils to nitrogen input: rapidly altered NO and N₂O emissions and *nirK* abundance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 45, p. 855-863, 2009.

TASSINARI, D.; ANDRADE, M. L. C.; JUNIOR, M. S. D.; MARTINS, R. P.; ROCHA, W. W.; PAIS, P. S. M.; SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvesting, skidding and wood processing in eucalyptus forests on coarse-textured tropical soils. **Soil Use and Management**, v. 35, p. 400-411, 2019.

TEEPE, R.; BRUMME, R.; BEESE, F.; LUDWIG, B. Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 605-611, 2002.

TIAN, Z.; WANG, J. J.; LIU, S.; ZHANG, Z.; DODLA, S. K.; MYERS, G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of the Total Environment**, v. 533, p. 329-338, 2015.

TIERLING, J.; KUHLMANN H. Emissions of nitrous oxide (N₂O) affected by pH-related nitrite accumulation during nitrification of N fertilizers. **Geoderma**, v. 310, p. 12-21, 2018.

TONG, D.; XU, R. Effects of urea and (NH₄)₂SO₄ on nitrification and acidification of Ultisols from Southern China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 24, p. 682-689, 2012.

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

VELOSO, M. G.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; PERGHER, M.; BAYER, C.; HIGA, R. C. V. Long-term loblolly pine land use reduces methane and net greenhouse gas emissions in a subtropical Cambisol, despite increasing nitrous oxide. **Annals of Forest Science**, v. 76, 2019.

VILSMEIER, K.; BORNEMISZA, E.; AMBERGER, A. Urea, ammonium sulfate and dicyandiamide transformations in Costan Rican soils. **Fertilizer Research**, v. 12, p. 255-261, 1987.

WANG, Q.; HU, H.; SHEN, J.; DU, S.; ZHANG, L.; HE, J.; HAN, L. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) in N₂O emissions and the abundance of nitrifiers and denitrifiers in two contrasting agricultural soil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, p. 1635-1643, 2017.

WANG, Y.; CHENG, S.; FANG, H.; YU, G.; XU, M.; DANG, X.; LI, L.; WANG, L. Simulated nitrogen deposition reduces CH₄ uptake and increases N₂O emission from a Subtropical plantation forest soil in Southern China. **Plos One**, v. 9, p. 1-10, 2014.

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

WARREN, C. R.; ADAMS, P. R. Uptake of nitrate, ammonium and glycine by plants of Tasmanian wet eucalypt forests. **Tree Physiology**, v. 27, p. 413-419, 2007.

WATSON, C. J.; AKHONZADA, N. A.; HAMILTON, J. T. G.; MATTHEWS, D. I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 246-253, 2008.3

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FERREIRA FILHO, P. J.; POGETTO, M. H. F. A. D. Guia prático de manejo de plantações de eucalipto. Botucatu: FEPAF, 2008.

WREGE, M. S., STEINMETZ, S., JÚNIOR, C. R., ALMEIDA, I. R. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Technical report. Brasília: Embrapa, 2012.

YANG, M.; FANG, Y.; SUN, D.; YAUNLIANG, S. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. **Nature**, p. 1-10, 2016.

YIN, S.; ZHANG, X.; PUMPANEN, J.; SHEN, G.; XIONG, F.; LIU, C. Seasonal variation in soil greenhouse gas emissions at three age-stages of dawn redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) stands in an alluvial island, Eastern China. **Forests**, v. 7, p. 1-15, 2016.

ZANATTA, J. A.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; TOMAZI, M.; FERNANDES, A. H. B. M.; COSTA, F. S.; CARVALHO, A. M. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. 1. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; VIEIRA, F. C. B.; GOMES, J.; TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian Gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1653-1665, 2010.

ZENG, S.; JACOBS, D. F.; SLOAN, J. L.; XUE, L.; LI, Y.; CHU, S. Split fertilizer application affects growth, biomass allocation, and fertilizer uptake efficiency of hybrid *Eucalyptus*. **New Forests**, v. 44, p. 703-718, 2013.

ZHANG, K.; ZHENG, H. CHEN, F.; LI, R.; YANG, M.; OUYANG, Z. Impact of nitrogen fertilization on soil-atmosphere greenhouse gas exchanges in eucalypt plantations with different soil characteristics in southern China. **Plos One**, v. 12, p. 1-14, 2017.

APÊNDICE 1 – FLUXOS DE N₂O E CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO I

APÊNDICE 1 - FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DURANTE 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO EM CASA DE VEGETAÇÃO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 15 | 17 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 34 | 38 | 42 | 48 | 50 | 53 | 55 | 57 | 59 | 62 | 64 | 66 | |
| | <i>N₂O (µg N m⁻² h⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 0.7 | 2.8 | 1.0 | 2.5 | 2.4 | 3.1 | 4.4 | 4.4 | 3.6 | 2.9b | 2.6b | 3.0b | 3.9b | 5.2b | 5.1c | 7.5b | 5.2b | 5.8b | 3.0b | 2.2c | |
| U | 0.8 | 2.5 | 1.3 | 3.2 | 3.0 | 4.8 | 9.3 | 12.7 | 9.2 | 6.6a | 5.3b | 11.0a | 31.3a | 25.6a | 28.1a | 72.7a | 55.2a | 83.6a | 59.3a | 69.1a | |
| U-P | 1.0 | 3.0 | 1.8 | 3.5 | 3.0 | 6.1 | 10.9 | 15.2 | 11.3 | 6.5a | 7.5a | 19.3a | 34.8a | 29.3a | 31.5a | 79.7a | 60.3a | 85.5a | 48.5a | 58.3a | |
| U-DCD | 1.0 | 2.6 | 1.3 | 3.5 | 2.8 | 5.3 | 8.4 | 11.5 | 6.0 | 3.6b | 2.5b | 3.6b | 5.0b | 5.2b | 4.6c | 9.6b | 5.6b | 9.3b | 6.8b | 7.9c | |
| U-NBPT | 1.4 | 2.8 | 1.5 | 5.3 | 3.6 | 7.0 | 9.1 | 11.4 | 9.6 | 6.4a | 7.4a | 16.1a | 23.1a | 20.4a | 18.6a | 43.6b | 29.0a | 51.4a | 34.6a | 31.0b | |
| U-NBPT-DCD | 1.1 | 2.6 | 1.3 | 4.1 | 3.5 | 5.8 | 9.5 | 11.8 | 7.5 | 5.6a | 7.8a | 13.7a | 19.1a | 13.9b | 16.4a | 35.1b | 29.7a | 54.3a | 36.7a | 44.6a | |
| SA | 0.6 | 2.7 | 1.5 | 3.6 | 3.4 | 4.6 | 7.1 | 7.5 | 6.3 | 4.3b | 4.3b | 5.4b | 6.7b | 6.9b | 6.6b | 13.1b | 8.1b | 10.1b | 5.0b | 4.9c | |
| SA-P | 0.9 | 2.6 | 1.2 | 2.5 | 2.2 | 3.2 | 4.4 | 4.6 | 3.4 | 2.9b | 2.4b | 2.8b | 3.8b | 4.3b | 4.4c | 7.5b | 4.4b | 5.1b | 2.7b | 1.9c | |
| SA-DCD | 0.6 | 3.1 | 1.3 | 3.7 | 2.8 | 4.7 | 6.4 | 7.4 | 5.8 | 4.0b | 4.4b | 7.3b | 10.0b | 9.1b | 8.8b | 18.8b | 15.1a | 24.8b | 19.5b | 27.0b | |
| | <i>CH₄ (µg C m⁻² h⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | -13.2 | -13.5 | -13.8 | -13.0 | -12.9 | -12.3 | -12.5 | -12.0 | -12.8 | -11.3 | -11.9 | -12.7 | -11.2 | -12.2 | -12.6 | -12.1 | -11.9 | -13.0 | -11.9 | -12.3 | |
| U | -13.4 | -13.3 | -13.5 | -13.1 | -13.0 | -12.8 | -12.9 | -12.7 | -13.0 | -12.5 | -12.6 | -12.8 | -12.6 | -12.7 | -12.7 | -12.6 | -12.5 | -12.6 | -12.2 | -12.2 | |
| U-P | -13.4 | -13.3 | -13.4 | -13.3 | -13.0 | -12.9 | -12.9 | -12.8 | -12.9 | -12.6 | -12.7 | -12.9 | -12.7 | -12.8 | -12.8 | -12.6 | -12.5 | -12.6 | -12.4 | -12.3 | |
| U-DCD | -12.9 | -13.0 | -13.2 | -13.1 | -12.8 | -12.6 | -12.8 | -12.5 | -12.7 | -12.3 | -12.5 | -12.6 | -12.5 | -12.6 | -12.5 | -12.4 | -12.6 | -12.6 | -12.3 | -12.3 | |
| U-NBPT | -13.1 | -12.8 | -13.3 | -13.1 | -12.1 | -12.8 | -12.9 | -12.6 | -12.9 | -12.5 | -12.5 | -12.8 | -12.6 | -12.8 | -12.7 | -12.5 | -12.5 | -12.6 | -12.4 | -12.6 | |
| U-NBPT-DCD | -13.2 | -13.1 | -13.4 | -13.1 | -12.9 | -12.8 | -12.9 | -12.8 | -12.9 | -12.5 | -12.6 | -12.8 | -12.7 | -12.8 | -12.7 | -12.6 | -12.6 | -12.8 | -12.4 | -12.5 | |
| SA | -13.4 | -13.4 | -13.5 | -13.0 | -13.0 | -12.9 | -12.8 | -12.8 | -13.0 | -13.0 | -12.7 | -13.0 | -12.8 | -12.6 | -12.8 | -12.8 | -12.7 | -12.9 | -12.7 | -12.7 | |
| SA-P | -13.4 | -13.3 | -13.4 | -13.1 | -13.1 | -12.9 | -13.0 | -12.9 | -13.0 | -12.6 | -12.8 | -13.0 | -12.8 | -12.9 | -12.8 | -12.8 | -12.7 | -12.9 | -12.7 | -12.7 | |
| SA-DCD | -12.9 | -13.1 | -13.4 | -13.2 | -12.9 | -12.8 | -12.9 | -12.7 | -12.8 | -12.3 | -12.5 | -12.7 | -12.5 | -12.7 | -12.5 | -12.3 | -12.3 | -12.5 | -12.3 | -12.3 | |

Continua....

Continua....

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|--|
| | 69 | 71 | 73 | 76 | 78 | 80 | 83 | 85 | 87 | 90 | 92 | 94 | 97 | 99 | 101 | 104 | 106 | 108 | 111 | 113 | |
| | N_2O ($\mu g N m^{-2} h^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 2.0 b | 2.6 b | 4.8 b | 6.3 b | 8.8 b | 3.8 b | 2.8 c | -0.3 b | -2.6 b | 4.3 c | -4.1 c | -5.8 c | -6.4 b | -17.1 b | -7.3 b | -7.8 d | -8.5 b | -12.1 b | -6.5 b | -9.3 b | |
| U | 39.7 a | 106.4 a | 153.9 a | 181.3 a | 241.1 a | 191.5 a | 138.0 a | 153.6 a | 193.7 a | 204.4 a | 1016.2 a | 1033.4 a | 839.1 a | 874.6 a | 859.5 a | 788.3 a | 896.0 a | 735.3 a | 709.7 a | 826.0 a | |
| U-P | 83.3 a | 102.2 a | 160.1 a | 150.4 a | 212.5 a | 165.8 a | 88.4 a | 181.1 a | 210.3 a | 212.9 a | 692.5 b | 769.8 b | 623.3 a | 756.0 a | 709.6 a | 787.8 a | 672.2 a | 457.0 a | 641.1 a | 693.7 a | |
| U-DCD | 6.1 b | 11.2 b | 18.1 b | 20.6 b | 24.9 b | 14.4 b | 8.6 c | 7.0 b | 8.7 b | 9.8 c | 31.7 c | 45.2 c | 44.3 b | 29.4 b | 21.2 b | 17.1 d | 21.7 b | 14.3 b | 23.5 b | 21.3 b | |
| U-NBPT | 42.3 a | 51.4 a | 85.4 a | 108.7 a | 144.3 a | 111.8 a | 89.6 a | 113.9 a | 144.7 a | 149.3 a | 1036.9 a | 1063.6 a | 873.3 a | 890.3 a | 858.1 a | 795.2 a | 1084.6 a | 774.2 a | 774.8 a | 774.6 a | |
| U-NBPT-DCD | 72.8 a | 77.5 a | 121.9 a | 138.2 a | 197.8 a | 159.9 a | 120.3 a | 155.2 a | 150.9 a | 156.8 a | 699.7 b | 843.7 b | 838.9 a | 481.7 a | 774.5 a | 659.3 b | 690.2 a | 594.2 a | 678.8 a | 546.0 a | |
| SA | 6.6 b | 8.3 b | 14.8 b | 17.9 b | 28.6 b | 26.4 b | 27.2 b | 31.5 a | 35.2 a | 43.9 b | 261.2 b | 281.9 b | 248.8 b | 272.2 b | 386.9 a | 362.7 c | 321.7 b | 247.2 b | 312.5 b | 452.3 a | |
| SA-P | 1.8 b | 2.5 b | 4.3 b | 5.8 b | 8.1 b | 3.1 b | 2.2 c | -0.4 b | -1.9 b | 4.1 c | 553.5 b | 611.1 c | 630.3 a | 590.2 a | 540.8 a | 512.2 b | 629.1 a | 516.1 a | 476.0 a | 442.2 a | |
| SA-DCD | 36.1 a | 48.0 a | 74.2 a | 97.6 a | 158.7 a | 131.3 a | 104.0 a | 131.9 a | 139.6 a | 118.5 a | -7.5 c | -1.3 c | -9.2 b | -8.9 b | -16.0 b | -11.1 d | -9.2 b | -10.5 b | -12.0 b | -1.9 b | |

CH_4 ($\mu g C m^{-2} h^{-1}$)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Controle | -12.2 | -14.2 | -13.2 | -13.7 | -13.4 | -13.3 | -13.8 | -14.4 | -13.8 | -13.9 | -13.9 b | -13.9 b | -14.0 | -13.7 b | -13.9 | -13.4 c | -14.1 b | -14.0 c | -13.5 b | -10.9 b |
| U | -12.3 | -12.4 | -12.3 | -12.3 | -12.5 | -12.2 | -12.1 | -12.0 | -12.1 | -12.2 | -8.5 a | -8.8 a | -8.7 | -8.6 a | -9.0 | -8.1 a | -8.3 a | -8.7 a | -8.6 a | -6.4 a |
| U-P | -12.3 | -12.4 | -12.3 | -12.5 | -12.4 | -12.2 | -12.3 | -12.4 | -12.3 | -12.2 | -9.6 a | -7.7 a | -8.0 | -7.5 a | -7.9 | -9.1 a | -8.3 a | -9.9 a | -8.8 a | -6.6 a |
| U-DCD | -12.4 | -12.7 | -12.7 | -12.8 | -12.5 | -12.6 | -12.9 | -13.0 | -12.7 | -12.8 | -11.7 b | -11.1 b | -11.2 | -10.9 b | -12.2 | -10.7 b | -10.5 b | -11.0 b | -10.4 b | -7.4 a |
| U-NBPT | -12.4 | -12.8 | -12.6 | -12.6 | -12.5 | -12.4 | -12.5 | -12.5 | -13.0 | -12.3 | -9.1 a | -8.8 a | -8.4 | -8.3 a | -9.4 | -8.4 a | -7.9 a | -8.3 a | -8.2 a | -5.4 a |
| U-NBPT-DCD | -12.4 | -12.8 | -12.5 | -12.6 | -12.3 | -12.2 | -12.5 | -12.4 | -12.1 | -11.7 | -10.1 a | -9.6 a | -9.3 | -9.1 a | -11.0 | -8.4 a | -8.6 a | -8.9 a | -8.5 a | -5.9 a |
| SA | -12.8 | -13.1 | -12.9 | -12.9 | -12.9 | -12.8 | -13.0 | -12.7 | -12.7 | -12.2 | -7.9 a | -10.4 a | -8.3 | -8.2 a | -10.4 | -10.1 b | -9.7 b | -9.6 b | -9.3 b | -6.7 a |
| SA-P | -12.4 | -13.2 | -13.0 | -13.1 | -13.0 | -12.9 | -13.0 | -13.1 | -13.0 | -13.1 | -8.7 a | -8.3 a | -8.5 | -8.1 a | -9.0 | -7.8 a | -8.0 a | -7.8 a | -7.6 a | -6.2 a |
| SA-DCD | -12.3 | -12.7 | -12.5 | -12.4 | -12.0 | -12.1 | -12.0 | -12.2 | -12.1 | -12.0 | -12.5 b | -12.4 b | -7.9 | -12.2 b | -11.2 | -11.6 b | -11.7 b | -11.7 b | -11.6 b | -9.4 b |

Continua...

Continua...

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 115 | 119 | 122 | 126 | 129 | 133 | 136 | 140 | 143 | 147 | 150 | 154 | 157 | 161 | 164 | 168 | 171 | 174 | 177 |
| | N_2O ($\mu g N m^{-2} h^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 8,7 b | -7,1 b | -8,5 b | -5,2 b | -5,3 b | -2,1 b | -5,3 c | -0,5 b | -3,8 b | -0,5 b | 0,2 b | 0,2 b | 1,6 b | 0,6 c | 0,6 b | -0,1 | -0,2 | 0,8 b | 1,1 |
| U | 1370,5 a | 717,8 a | 744,4 a | 435,2 a | 538,6 a | 442,8 a | 469,9 b | 235,2 a | 225,2 a | 149,9 a | 194,0 a | 106,3 a | 115,2 a | 45,0 a | 23,1 b | 19,4 | 12,8 | 12,4 b | 13,1 |
| U-P | 881,5 a | 518,5 a | 865,9 a | 528,7 a | 544,4 a | 499,0 a | 561,1 a | 293,5 a | 308,4 a | 178,5 a | 239,9 a | 159,6 a | 228,3 a | 104,2 a | 80,1 a | 25,1 | 14,0 | 32,2 a | 35,3 |
| U-DCD | 105,9 b | 27,2 b | 24,7 b | 13,2 b | 14,7 b | 12,7 b | 33,2 c | 7,1 b | 14,9 b | 10,2 b | 14,8 b | 11,3 b | 22,2 b | 13,0 a | 11,8 b | 14,6 | 6,0 | 5,8 b | 8,1 |
| U-NBPT | 1159,7 a | 803,4 a | 782,5 a | 560,3 a | 527,6 a | 377,5 a | 422,5 b | 269,4 a | 181,1 a | 144,0 a | 136,5 a | 85,1 a | 88,0 b | 33,7 a | 23,0 b | 22,8 | 14,5 | 13,3 b | 11,1 |
| U-NBPT-DCD | 523,6 a | 549,1 a | 635,3 a | 412,7 a | 468,3 a | 314,7 a | 303,5 b | 147,5 a | 118,7 b | 50,0 b | 49,4 b | 26,0 b | 29,4 b | 16,9 a | 15,3 b | 26,0 | 17,3 | 3,3 b | 36,1 |
| SA | 752,7 a | 361,3 a | 562,0 a | 422,2 a | 411,3 a | 445,7 a | 754,1 a | 336,4 a | 281,1 a | 201,4 a | 226,4 a | 130,4 a | 181,7 a | 69,5 a | 50,2 a | 48,3 | 21,0 | 34,8 a | 47,8 |
| SA-P | 668,0 a | 241,3 b | 291,9 b | 168,4 b | 142,0 b | 92,8 b | 99,3 c | 22,2 b | 14,9 b | 7,2 b | 8,9 b | 9,0 b | 13,7 b | 4,6 b | 4,3 b | 2,8 | 1,7 | 1,2 b | 1,9 |
| SA-DCD | -2,5 b | -7,8 b | -13,0 b | -7,3 b | -8,9 b | -3,3 b | -6,6 c | -0,7 b | -0,6 b | 0,1 b | 0,6 b | 1,8 b | 3,5 b | 2,2 b | 1,8 b | 1,7 | 1,4 | 1,2 b | 2,6 |
| | CH_4 ($\mu g C m^{-2} h^{-1}$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | -10,1 c | -11,6 c | -13,7 c | -12,8 d | -13,3 c | -10,5 b | -11,0 b | -12,7 c | -13,8 c | -11,8 c | -12,0 c | -13,4 c | -13,4 c | -12,7 c | -11,9 b | -13,5 c | -12,5 c | -13,7 b | -14,8 b |
| U | -3,9 a | -4,3 a | -5,1 a | -4,9 a | -5,1 a | -4,3 a | -4,2 a | -3,8 a | -5,2 a | -3,2 a | -3,9 a | -4,0 a | -5,3 a | -4,5 a | -4,1 a | -5,7 a | -3,8 a | -5,7 a | -5,7 a |
| U-P | -3,4 a | -5,0 a | -5,4 a | -5,4 a | -6,1 a | -4,6 a | -4,9 a | -4,5 a | -5,2 a | -3,7 a | -4,1 a | -4,5 a | -5,8 a | -4,7 a | -4,7 a | -4,8 a | -3,7 a | -6,2 a | -6,4 a |
| U-DCD | -5,5 a | -7,5 b | -8,2 a | -7,6 b | -7,9 b | -6,4 a | -5,6 a | -6,9 b | -7,1 a | -5,7 b | -5,7 b | -5,7 b | -6,1 a | -5,6 a | -5,1 a | -5,7 a | -4,7 a | -5,5 a | -6,6 a |
| U-NBPT | -3,7 a | -4,4 a | -5,2 a | -5,0 a | -5,3 a | -4,6 a | -3,9 a | -3,6 a | -4,9 a | -3,0 a | -3,7 a | -3,9 a | -4,9 a | -5,2 a | -4,6 a | -6,1 a | -5,9 b | -6,6 a | -5,6 a |
| U-NBPT-DCD | -4,2 a | -4,7 a | -5,9 a | -4,8 a | -5,1 a | -4,6 a | -3,7 a | -3,9 a | -4,3 a | -3,3 a | -3,9 a | -4,2 a | -5,3 a | -5,3 a | -5,4 a | -6,5 b | -7,0 b | -7,6 a | -7,8 a |
| SA | -5,0 a | -4,8 a | -6,3 a | -4,8 a | -4,8 a | -4,3 a | -4,5 a | -4,3 a | -4,4 a | -2,8 a | -3,6 a | -2,9 a | -4,6 a | -3,4 a | -2,8 a | -4,3 a | -3,1 a | -3,6 a | -5,6 a |
| SA-P | -4,6 a | -4,1 a | -6,6 a | -6,4 b | -6,9 b | -6,7 a | -6,6 a | -6,8 b | -7,7 a | -5,6 b | -6,7 b | -6,6 b | -8,6 b | -7,6 b | -7,0 a | -8,3 b | -6,8 b | -7,4 a | -8,6 a |
| SA-DCD | -7,8 b | -8,2 b | -10,3 b | -8,8 c | -8,7 b | -8,6 b | -8,7 b | -7,5 b | -9,3 b | -6,9 b | -7,7 b | -7,1 b | -8,1 b | -7,0 b | -6,6 a | -7,1 b | -6,9 b | -6,7 a | -8,7 a |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: ausência de letras após médias não as difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

APÊNDICE 2 – PPA E pH_{CaCl_2} DO SOLO DO CAPÍTULO I

APÊNDICE 2 - POROSIDADE PREENCHIDA POR ÁGUA (PPA) E pH_{CaCl_2} DA CAMADA 0-5 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DURANTE 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 15 | 17 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 34 | 38 | 42 | 48 | 50 | 53 | 55 | 57 | 59 | 62 | 64 | 66 | |
| | <i>PPA (%)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 52,3 | 48,6 | 34,9 | 57,0 | 50,8 | 56,7 | 53,2 | 55,8 | 50,6 | 55,8 b | 48,1 | 48,3 | 55,0 | 52,7 | 55,1 | 54,6 | 55,9 | 50,4 | 56,9 | 54,2 | |
| U | 51,6 | 46,3 | 34,1 | 53,2 | 50,1 | 57,9 | 52,0 | 56,9 | 49,1 | 52,1 b | 43,2 | 46,6 | 53,1 | 52,6 | 46,0 | 62,1 | 52,9 | 45,9 | 56,2 | 52,2 | |
| U-P | 55,0 | 54,7 | 44,7 | 55,4 | 53,2 | 55,3 | 52,4 | 60,2 | 53,2 | 48,5 b | 48,0 | 46,9 | 53,9 | 53,0 | 51,7 | 55,6 | 54,7 | 49,8 | 56,2 | 55,2 | |
| U-DCD | 51,5 | 49,2 | 52,7 | 54,3 | 53,3 | 50,9 | 51,5 | 51,0 | 51,8 | 53,8 b | 48,4 | 50,0 | 55,3 | 52,0 | 47,5 | 56,1 | 54,7 | 48,4 | 57,0 | 54,0 | |
| U-NBPT | 53,2 | 45,0 | 35,3 | 50,6 | 47,3 | 55,7 | 50,9 | 57,2 | 53,6 | 54,1 b | 44,2 | 43,4 | 52,5 | 52,4 | 47,3 | 51,5 | 54,6 | 47,6 | 54,2 | 51,2 | |
| U-NBPT-DCD | 51,7 | 45,1 | 47,9 | 54,4 | 53,3 | 56,3 | 50,8 | 59,8 | 46,8 | 54,2 b | 49,3 | 48,5 | 46,6 | 51,5 | 46,4 | 56,0 | 53,5 | 47,7 | 56,4 | 50,1 | |
| SA | 52,9 | 48,8 | 37,6 | 54,4 | 52,7 | 58,1 | 51,0 | 57,2 | 54,4 | 61,5 a | 47,7 | 51,6 | 54,9 | 53,9 | 55,1 | 60,3 | 54,7 | 49,2 | 56,2 | 54,2 | |
| SA-P | 52,0 | 47,3 | 40,9 | 55,5 | 56,2 | 57,6 | 53,6 | 54,8 | 51,5 | 53,3 b | 44,8 | 45,1 | 55,5 | 53,0 | 45,6 | 56,1 | 52,8 | 53,6 | 55,1 | 50,6 | |
| SA-DCD | 50,1 | 45,0 | 44,1 | 52,6 | 50,3 | 54,6 | 50,3 | 56,9 | 48,4 | 52,0 b | 44,7 | 45,0 | 52,7 | 51,0 | 42,6 | 57,5 | 52,9 | 43,8 | 55,6 | 52,1 | |
| | <i>pH_{CaCl2}</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | |
| U | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,1 | 5,3 | |
| U-P | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | |
| U-DCD | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,5 | 5,4 | 5,3 | 5,2 | 5,4 | |
| U-NBPT | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | |
| U-NBPT-DCD | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,1 | 5,3 | |
| SA | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,1 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | |
| SA-P | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | |
| SA-DCD | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,6 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,4 | |

Continua...

Continua...

| Tratamiento | Dias após plantío | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|--|
| | 69 | 71 | 73 | 76 | 78 | 80 | 83 | 85 | 87 | 90 | 92 | 94 | 97 | 99 | 101 | 104 | 106 | 108 | 111 | 113 | |
| | PPA (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 46,0 | 58,3 | 52,3 | 48,1 | 48,3 | 59,9 | 46,1 | 47,9 | 54,1 | 48,5 | 43,1 | 40,7 | 37,2 | 37,9 | 48,4 | 51,7 a | 45,3 | 46,9 | 47,7 | 57,1 | |
| U | 47,5 | 58,2 | 49,6 | 47,8 | 46,0 | 49,7 | 44,7 | 48,9 | 50,4 | 49,6 | 52,0 | 39,3 | 36,5 | 39,8 | 50,3 | 52,0 a | 53,8 | 50,6 | 52,4 | 58,3 | |
| U-P | 50,6 | 57,7 | 49,5 | 48,1 | 50,8 | 55,1 | 47,9 | 56,1 | 55,4 | 47,4 | 55,9 | 42,5 | 39,4 | 42,7 | 52,6 | 55,9 a | 53,8 | 55,6 | 54,2 | 60,7 | |
| U-DCD | 49,3 | 57,2 | 51,9 | 44,4 | 46,0 | 50,2 | 48,0 | 48,9 | 53,6 | 49,1 | 52,0 | 38,8 | 35,0 | 37,8 | 46,6 | 50,1 a | 50,1 | 47,4 | 48,8 | 57,2 | |
| U-NBPT | 47,2 | 56,8 | 50,2 | 45,0 | 47,3 | 44,2 | 42,7 | 48,2 | 55,1 | 45,5 | 48,7 | 39,7 | 35,0 | 39,5 | 53,1 | 55,0 a | 49,8 | 52,7 | 51,9 | 57,4 | |
| U-NBPT-DCD | 48,7 | 57,5 | 49,3 | 42,1 | 45,2 | 60,9 | 43,2 | 46,3 | 50,3 | 42,6 | 52,1 | 40,1 | 37,7 | 37,5 | 47,0 | 52,3 a | 52,6 | 51,7 | 47,5 | 61,0 | |
| SA | 49,3 | 57,7 | 53,0 | 47,2 | 48,7 | 64,6 | 46,8 | 48,4 | 54,6 | 44,5 | 54,1 | 38,6 | 37,2 | 40,9 | 47,8 | 51,4 a | 50,7 | 46,4 | 49,7 | 59,1 | |
| SA-P | 49,4 | 56,2 | 52,2 | 43,3 | 47,9 | 44,6 | 43,6 | 44,5 | 53,1 | 51,6 | 52,4 | 36,8 | 36,5 | 38,2 | 53,6 | 51,4 a | 49,3 | 45,8 | 52,4 | 58,3 | |
| SA-DCD | 47,8 | 57,1 | 48,0 | 41,4 | 45,0 | 53,4 | 40,6 | 45,4 | 50,2 | 47,1 | 49,9 | 37,5 | 33,6 | 31,9 | 43,2 | 40,3 b | 39,7 | 38,2 | 39,6 | 51,0 | |

pH_{CaO2}

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|-----|
| Controle | 5,3 | 5,4 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,4 | 5,3 | 5,2 | 5,3 b | 5,2 b | 5,3 b | 5,2 b | 5,2 | 5,3 b | 5,1 b | 5,3 | 5,3 |
| U | 5,4 | 5,1 | 5,1 | 5,2 | 5,1 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 4,8 | 5,2 | 5,6 | 5,9 a | 5,9 a | 5,7 a | 5,7 a | 5,1 | 6,1 a | 5,5 a | 5,3 | 5,5 |
| U-P | 5,4 | 5,2 | 5,2 | 5,1 | 5,1 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,5 | 5,6 a | 5,9 a | 5,7 a | 5,7 a | 5,5 | 5,8 a | 5,4 a | 5,5 | 5,4 |
| U-DCD | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,6 | 5,8 a | 5,9 a | 5,8 a | 6,0 a | 5,6 | 5,9 a | 5,5 a | 5,9 | 5,8 |
| U-NBPT | 5,4 | 5,3 | 5,1 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,7 a | 5,9 a | 5,7 a | 5,7 a | 5,3 | 5,6 b | 5,4 a | 5,2 | 5,3 |
| U-NBPT-DCD | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,5 | 5,7 a | 5,8 a | 5,6 a | 5,8 a | 5,9 | 5,9 a | 5,7 a | 5,2 | 5,7 |
| SA | 5,4 | 5,0 | 5,1 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,1 | 5,1 | 5,1 | 5,4 | 5,2 b | 5,3 b | 5,2 b | 5,2 b | 5,2 | 5,1 b | 5,0 b | 5,2 | 5,2 |
| SA-P | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,1 | 5,1 | 5,3 | 5,3 | 4,9 | 5,3 | 5,2 | 5,5 | 5,5 a | 5,7 a | 5,6 a | 5,6 a | 5,4 | 5,6 b | 4,9 b | 5,5 | 5,5 |
| SA-DCD | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,3 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,3 b | 5,2 b | 5,3 b | 5,2 b | 5,3 | 5,3 b | 5,1 b | 5,2 | 5,2 |

Continua...

Continua...

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|
| | 115 | 119 | 122 | 126 | 129 | 133 | 136 | 140 | 143 | 147 | 150 | 154 | 157 | 161 | 164 | 168 | 171 | 174 | 177 |
| | <i>PPA (%)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 56,9 | 46,4 | 36,5 | 40,4 | 40,2 | 48,1 | 54,4 a | 34,3 b | 36,2 b | 35,3 b | 39,2 b | 46,9 | 51,2 | 43,1 | 43,2 | 50,4 | 30,0 | 37,7 a | 54,9 |
| U | 59,1 | 50,3 | 46,5 | 47,6 | 50,5 | 59,3 | 57,2 a | 46,6 a | 45,9 a | 49,5 a | 49,8 a | 47,5 | 50,6 | 41,2 | 43,5 | 45,6 | 31,2 | 32,1 b | 52,3 |
| U-P | 60,7 | 58,1 | 44,1 | 51,6 | 50,6 | 60,0 | 60,9 a | 48,5 a | 56,2 a | 50,9 a | 53,4 a | 49,0 | 52,3 | 43,1 | 46,7 | 44,2 | 29,7 | 32,6 b | 48,7 |
| U-DCD | 57,8 | 47,9 | 46,6 | 41,0 | 40,6 | 52,5 | 54,1 a | 34,4 b | 35,0 b | 37,0 b | 36,3 b | 50,3 | 44,1 | 33,9 | 43,0 | 45,6 | 29,5 | 33,4 b | 55,5 |
| U-NBPT | 60,8 | 49,8 | 37,5 | 49,2 | 48,2 | 60,3 | 60,3 a | 46,9 a | 48,9 a | 45,9 a | 51,5 a | 48,2 | 52,5 | 46,7 | 52,0 | 56,0 | 39,5 | 35,2 a | 57,8 |
| U-NBPT-DCD | 58,0 | 51,7 | 42,0 | 47,5 | 44,1 | 56,6 | 56,9 a | 42,7 a | 39,5 b | 47,8 a | 46,1 a | 49,8 | 49,0 | 43,9 | 43,4 | 46,2 | 30,9 | 31,1 b | 52,8 |
| SA | 59,2 | 48,3 | 40,8 | 44,9 | 46,8 | 55,8 | 56,9 a | 36,6 b | 32,0 b | 44,5 a | 39,7 b | 42,2 | 48,1 | 41,1 | 43,5 | 48,1 | 29,4 | 33,1 b | 59,5 |
| SA-P | 57,6 | 49,3 | 40,9 | 38,0 | 36,8 | 49,9 | 52,1 a | 28,9 b | 30,7 b | 36,1 b | 31,2 b | 40,3 | 45,0 | 35,4 | 38,2 | 43,0 | 27,6 | 31,7 b | 56,4 |
| SA-DCD | 52,7 | 43,6 | 32,8 | 32,0 | 32,4 | 45,1 | 43,9 b | 25,5 b | 30,0 b | 34,0 b | 31,8 b | 40,6 | 45,7 | 31,9 | 40,7 | 44,8 | 27,8 | 31,5 b | 55,9 |
| | <i>pH_{caeciz}</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 5,4 b | 5,4 | 5,3 a | 5,2 a | 5,3 a | 5,4 a | 5,4 a | 5,3 | 5,3 a | 5,5 a | 5,3 | 5,5 | 5,5 a | 5,5 a | 5,2 a | 5,4 a | 5,3 | 5,1 a | 5,3 a |
| U | 6,2 a | 5,2 | 5,3 a | 4,6 b | 4,7 b | 4,9 b | 4,8 b | 5,0 | 4,7 b | 4,6 b | 5,2 | 5,3 | 4,6 c | 4,9 b | 4,9 b | 5,2 a | 4,9 | 5,1 a | 5,0 a |
| U-P | 5,5 b | 4,9 | 5,3 a | 5,1 a | 5,0 b | 4,9 b | 5,0 b | 4,9 | 5,0 b | 5,2 a | 5,2 | 4,9 | 5,0 c | 5,1 b | 4,9 b | 5,0 b | 4,8 | 5,0 a | 5,0 a |
| U-DCD | 6,0 a | 6,0 | 5,5 a | 5,2 a | 5,5 a | 5,7 a | 5,7 a | 5,1 | 5,4 a | 5,4 a | 5,5 | 5,3 | 5,7 a | 5,3 a | 5,3 a | 5,6 a | 5,3 | 5,0 a | 5,3 a |
| U-NBPT | 5,6 b | 5,3 | 4,7 b | 4,8 b | 4,7 b | 4,9 b | 4,8 b | 4,9 | 4,8 b | 5,1 a | 5,1 | 5,3 | 4,9 c | 5,2 b | 5,3 a | 5,0 b | 5,1 | 5,1 a | 4,9 a |
| U-NBPT-DCD | 5,5 b | 4,9 | 5,4 a | 5,0 a | 5,0 b | 4,9 b | 5,2 a | 4,8 | 4,9 b | 5,1 a | 4,9 | 4,9 | 4,9 c | 5,3 a | 5,2 a | 5,0 b | 5,0 | 5,1 a | 5,0 a |
| SA | 5,3 b | 4,9 | 4,8 b | 4,3 b | 4,6 b | 4,8 b | 4,7 b | 4,4 | 4,7 b | 4,6 b | 4,3 | 4,5 | 4,6 c | 5,0 b | 4,5 b | 4,7 b | 4,5 | 4,6 b | 4,4 b |
| SA-P | 5,5 b | 5,2 | 5,3 a | 4,6 b | 4,8 b | 5,1 b | 5,4 a | 5,0 | 4,9 b | 4,8 b | 5,1 | 4,9 | 5,2 b | 5,4 a | 5,0 b | 4,9 b | 4,9 | 4,7 b | 5,0 a |
| SA-DCD | 5,3 b | 5,2 | 5,2 a | 5,1 a | 4,9 b | 5,2 b | 5,2 a | 5,2 | 4,9 b | 4,9 b | 5,1 | 4,9 | 4,8 c | 5,0 b | 4,8 b | 4,7 b | 4,7 | 4,6 b | 4,7 b |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: ausência de letras após médias não as difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

APÊNDICE 3 – CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIO E NITRATO DO SOLO DO CAPÍTULO I

APÊNDICE 3 - CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIO E NITRATO DA CAMADA 0-5 CM DE LATOSSOLO VERMELHO DURANTE 177 DIAS APÓS O PLANTIO DE MUDAS DE EUCALIPTO EM VASOS, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|------|------|--|
| | 15 | 17 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 34 | 38 | 42 | 48 | 50 | 53 | 55 | 57 | 59 | 62 | 64 | 66 | |
| | <i>Amônio (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 6,7 | 7,1 | 6,8 | 9,2 | 9,2 | 10,9 | 11,9 | 8,5 | 8,9 | 10,9b | 2,4 | 1,3 | 5,0b | 7,4 | 7,3b | 9,0 | 7,2b | 5,0a | 3,8 | 2,4 | |
| U | 8,2 | 7,1 | 7,3 | 8,3 | 8,7 | 12,8 | 12,7 | 8,2 | 17,3 | 9,4b | 3,9 | 2,8 | 7,3a | 8,5 | 46,3a | 7,3 | 5,3b | 2,7b | 4,7 | 1,3 | |
| U-P | 8,8 | 7,6 | 8,8 | 13,4 | 10,7 | 13,2 | 10,9 | 10,5 | 10,0 | 8,1b | 3,0 | 3,9 | 4,0b | 7,1 | 7,1b | 10,1 | 6,5b | 5,6a | 5,7 | 1,4 | |
| U-DCCD | 8,2 | 8,8 | 9,0 | 11,4 | 9,2 | 13,9 | 8,2 | 9,5 | 11,2 | 11,3b | 3,6 | 4,3 | 5,9a | 9,0 | 8,2b | 21,4 | 10,0a | 4,6b | 6,6 | 2,2 | |
| U-NBPT | 10,4 | 11,8 | 6,5 | 8,4 | 8,1 | 11,8 | 7,3 | 10,1 | 11,4 | 9,6b | 2,8 | 3,0 | 3,0b | 6,8 | 6,3b | 8,9 | 6,0b | 4,3b | 5,7 | 2,7 | |
| U-NBPT-DCD | 8,1 | 6,6 | 7,8 | 12,1 | 15,6 | 17,1 | 17,9 | 8,8 | 348,6 | 8,8b | 4,3 | 3,2 | 3,6b | 7,1 | 5,5b | 7,8 | 5,6b | 4,5b | 6,6 | 1,9 | |
| SA | 8,2 | 7,6 | 7,3 | 14,9 | 12,1 | 9,9 | 11,8 | 8,5 | 23,4 | 13,4a | 4,1 | 2,6 | 3,9b | 5,8 | 10,1b | 9,9 | 7,4b | 6,0a | 3,9 | 2,3 | |
| SA-P | 8,4 | 7,3 | 7,6 | 10,6 | 10,2 | 9,1 | 10,8 | 8,2 | 10,4 | 17,6a | 8,8 | 2,9 | 4,1b | 6,2 | 6,7b | 10,2 | 9,6a | 5,7a | 8,1 | 1,9 | |
| SA-DCCD | 6,5 | 5,9 | 8,4 | 9,4 | 12,0 | 6,2 | 15,2 | 9,3 | 14,8 | 10,0b | 3,0 | 3,0 | 3,3b | 6,7 | 10,2b | 11,7 | 10,4a | 4,0b | 4,5 | 2,2 | |
| | <i>Nitrato (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 12,8 | 10,7 | 14,0 | 13,5 | 15,6 | 12,8 | 14,4 | 13,9 | 14,8b | 11,8 | 15,5 | 15,1 | 11,5b | 10,0b | 15,3b | 11,9c | 13,7b | 12,3c | 20,0 | 11,7 | |
| U | 10,9 | 11,1 | 14,8 | 13,7 | 19,8 | 15,8 | 19,9 | 13,7 | 16,5b | 15,8 | 15,8 | 16,2 | 23,5a | 39,9a | 113,6a | 53,2a | 34,5a | 19,7b | 37,7 | 13,8 | |
| U-P | 10,3 | 13,7 | 14,5 | 13,3 | 16,2 | 14,6 | 12,9 | 11,4 | 12,3b | 13,5 | 19,7 | 15,0 | 15,5b | 12,3b | 11,4b | 16,8c | 15,1b | 16,1c | 22,2 | 11,7 | |
| U-DCCD | 11,5 | 12,7 | 12,4 | 16,5 | 18,4 | 11,9 | 16,3 | 15,7 | 12,3b | 14,0 | 16,8 | 17,5 | 18,2a | 9,2b | 11,4b | 12,0c | 27,2a | 14,9c | 18,6 | 7,2 | |
| U-NBPT | 9,6 | 10,1 | 15,2 | 11,4 | 16,7 | 11,5 | 17,5 | 16,3 | 24,8a | 14,7 | 13,4 | 16,6 | 20,8a | 11,1b | 18,9b | 15,6c | 18,7b | 52,6a | 31,0 | 14,7 | |
| U-NBPT-DCD | 10,3 | 11,9 | 11,7 | 15,7 | 17,4 | 16,1 | 20,0 | 14,1 | 13,7b | 13,2 | 23,0 | 14,4 | 19,8a | 16,6b | 20,9b | 35,0b | 20,1b | 20,4b | 58,4 | 18,2 | |
| SA | 10,3 | 10,3 | 11,0 | 15,3 | 17,3 | 11,9 | 14,0 | 13,5 | 15,4b | 14,8 | 15,9 | 15,0 | 14,7b | 14,4b | 11,9b | 15,2c | 15,4b | 14,7c | 26,9 | 8,7 | |
| SA-P | 11,6 | 10,3 | 11,2 | 11,6 | 15,8 | 12,9 | 14,8 | 14,4 | 12,2b | 17,2 | 17,0 | 19,2 | 16,1b | 13,1b | 19,0b | 24,1c | 19,7b | 16,0c | 29,6 | 13,9 | |
| SA-DCCD | 12,3 | 12,5 | 10,4 | 15,7 | 15,5 | 15,5 | 20,4 | 13,7 | 26,3a | 15,9 | 17,3 | 16,8 | 23,1a | 17,8b | 22,9b | 23,4c | 20,0b | 24,7b | 29,2 | 9,0 | |

Continua...

Continua...

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| | 69 | 71 | 73 | 76 | 78 | 80 | 83 | 85 | 87 | 90 | 92 | 94 | 97 | 99 | 101 | 104 | 106 | 108 | 111 | 113 | |
| | <i>Amônio (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 1,6 | 2,5 c | 35,2 b | 7,3 b | 9,8 a | 4,2 b | 3,5 b | 5,1 b | 7,4 d | 6,6 b | 15,1 d | 23,0 e | 23,4 e | 19,4 d | 16,5 d | 20,0 d | 19,6 f | 12,6 e | 17,5 f | 6,3 e | |
| U | 1,6 | 3,0 c | 28,1 b | 28,5 a | 5,3 b | 3,4 b | 9,2 a | 5,4 b | 203,2 a | 9,4 b | 325,8 a | 571,7 b | 913,5 a | 626,5 b | 513,0 c | 353,2 c | 847,6 a | 710,9 b | 560,3 b | 174,1 d | |
| U-P | 2,0 | 4,7 b | 33,8 b | 26,0 a | 4,3 b | 4,4 b | 6,7 a | 5,1 b | 7,4 d | 7,0 b | 99,3 c | 305,2 d | 788,2 b | 344,1 c | 441,9 c | 692,1 a | 647,4 b | 439,6 c | 605,3 b | 210,9 d | |
| U-DCD | 2,7 | 2,7 c | 46,0 a | 40,6 a | 5,1 b | 3,4 b | 4,0 b | 5,4 b | 8,5 d | 9,5 b | 368,4 a | 470,4 c | 946,7 a | 698,9 a | 934,9 a | 536,4 b | 884,5 a | 676,7 b | 745,1 a | 320,1 c | |
| U-NBPT | 1,5 | 2,2 c | 30,6 b | 10,6 b | 4,6 b | 14,1 a | 4,9 b | 6,8 b | 58,6 b | 30,0 a | 96,3 c | 430,7 c | 663,4 c | 569,9 b | 735,0 b | 753,1 a | 537,4 c | 491,5 c | 162,5 e | 220,6 d | |
| U-NBPT-DCD | 1,6 | 2,7 c | 33,8 b | 21,5 a | 6,0 b | 4,3 b | 4,6 b | 5,5 b | 7,8 d | 6,9 b | 106,7 c | 329,6 d | 717,1 c | 440,0 c | 690,6 b | 686,9 a | 590,1 b | 485,7 c | 221,6 d | 176,5 d | |
| SA | 1,6 | 149,3 a | 39,3 a | 34,1 a | 6,1 b | 10,7 a | 3,9 b | 7,7 b | 13,8 c | 9,7 b | 235,3 b | 746,5 a | 792,8 b | 823,2 a | 746,2 b | 731,4 a | 781,7 a | 784,4 a | 716,4 a | 670,4 a | |
| SA-P | 1,8 | 4,1 b | 37,9 a | 39,5 a | 4,2 b | 4,0 b | 6,2 b | 9,5 b | 7,3 d | 8,3 b | 216,1 b | 460,1 c | 623,0 d | 456,3 c | 509,8 c | 537,3 b | 296,9 e | 349,3 d | 312,2 c | 72,4 e | |
| SA-DCD | 1,6 | 4,7 b | 26,9 b | 155,3 a | 12,0 a | 24,1 a | 9,2 a | 52,8 a | 66,9 b | 8,7 b | 406,0 a | 546,5 b | 547,1 d | 742,2 a | 431,5 c | 736,4 a | 356,6 d | 651,2 b | 622,5 b | 386,2 b | |
| | <i>Nitrato (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 16,5 | 9,4 c | 66,5 c | 29,8 e | 21,8 b | 18,6 d | 25,0 b | 16,2 e | 30,4 e | 19,5 d | 14,1 b | 18,4 b | 26,3 e | 22,7 b | 26,1 c | 29,2 e | 29,5 c | 27,5 d | 24,6 d | 21,0 e | |
| U | 22,0 | 15,3 c | 59,2 c | 58,0 d | 139,5 a | 77,5 b | 73,8 a | 44,4 d | 271,9 a | 124,3 b | 33,3 a | 45,9 a | 146,4 a | 93,8 a | 109,6 a | 128,9 b | 165,5 a | 165,2 a | 187,6 a | 224,1 a | |
| U-P | 7,7 | 40,7 b | 86,6 b | 114,5 b | 49,8 b | 63,7 c | 14,8 c | 20,2 e | 39,7 d | 58,4 c | 18,4 b | 35,8 b | 57,2 c | 103,6 a | 86,6 b | 162,3 a | 134,7 a | 195,0 a | 189,4 a | 143,3 b | |
| U-DCD | 10,5 | 12,8 c | 17,4 d | 62,9 d | 14,0 b | 19,9 d | 17,9 c | 23,5 e | 16,6 f | 36,7 d | 27,7 a | 31,3 b | 68,7 b | 47,2 b | 42,3 c | 71,3 d | 27,7 c | 84,4 b | 61,0 c | 26,4 e | |
| U-NBPT | 14,9 | 33,4 b | 148,5 a | 164,9 a | 46,4 b | 153,6 a | 101,2 a | 29,1 e | 237,5 b | 209,8 a | 17,8 b | 53,5 a | 136,8 a | 126,0 a | 105,1 a | 98,5 c | 171,2 a | 167,1 a | 201,1 a | 131,2 b | |
| U-NBPT-DCD | 16,8 | 10,7 c | 108,9 b | 90,0 c | 152,2 a | 98,8 b | 33,4 a | 79,3 b | 39,3 d | 50,7 c | 19,8 b | 39,7 a | 79,6 b | 67,2 b | 120,9 a | 125,6 b | 145,2 a | 185,0 a | 167,7 b | 141,3 b | |
| SA | 17,7 | 150,8 a | 17,7 d | 77,3 c | 25,0 b | 59,2 c | 49,5 a | 41,0 d | 47,0 c | 146,2 b | 29,3 a | 24,8 b | 43,3 d | 42,0 b | 75,9 b | 55,6 d | 89,1 b | 52,0 c | 73,9 c | 56,9 d | |
| SA-P | 16,2 | 18,9 c | 33,9 d | 157,2 a | 49,1 b | 57,2 c | 37,3 a | 161,7 a | 24,0 e | 46,7 c | 37,0 a | 31,1 b | 58,4 c | 51,2 b | 59,2 c | 90,5 c | 120,2 a | 160,8 a | 140,1 b | 104,5 c | |
| SA-DCD | 13,5 | 17,6 c | 45,9 c | 69,0 d | 43,7 b | 41,7 c | 40,2 a | 54,8 c | 48,3 c | 32,6 d | 22,3 b | 23,8 b | 20,3 e | 37,1 b | 44,7 c | 26,4 e | 24,8 c | 47,6 c | 20,3 d | 12,4 e | |

Continua...

Continua...

| Tratamento | Dias após plantio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--|
| | 115 | 119 | 122 | 126 | 129 | 133 | 136 | 140 | 143 | 147 | 150 | 154 | 157 | 161 | 164 | 168 | 171 | 174 | 177 | |
| | <i>Amônio (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 4,8 d | 4,8 e | 2,2 c | 3,1 b | 1,8 c | 1,6 c | 1,5 c | 1,6 b | 1,3 c | 1,2 d | 2,4 | 2,8 c | 3,3 b | 0,6 b | 2,3 c | 2,1 b | 1,0 b | 2,8 b | 3,8 b | |
| U | 317,8 a | 28,7 d | 85,6 b | 1,6 b | 17,5 c | 2,4 c | 1,8 c | 1,9 b | 3,2 c | 0,7 d | 3,0 | 2,0 c | 4,0 b | 1,0 b | 0,7 d | 1,3 b | 0,2 c | 1,1 b | 3,8 b | |
| U-P | 174,4 b | 50,7 c | 33,0 b | 2,6 b | 18,3 c | 2,2 c | 1,1 c | 0,9 b | 1,6 c | 2,7 d | 2,6 | 3,9 c | 1,1 b | 0,9 b | 0,6 d | 2,6 b | 0,1 c | 1,6 b | 3,4 b | |
| U-DCD | 264,4 a | 476,7 a | 251,3 a | 237,0 a | 336,0 a | 287,9 a | 152,7 a | 57,3 a | 89,8 b | 77,3 a | 7,7 | 167,4 a | 1,0 b | 0,8 b | 37,6 b | 2,3 b | 0,7 b | 1,4 b | 4,1 a | |
| U-NBPT | 289,6 a | 66,1 c | 46,6 b | 6,3 b | 4,3 c | 4,2 c | 1,6 c | 3,0 b | 0,9 c | 1,5 d | 1,9 | 1,4 c | 1,3 b | 0,7 b | 0,6 d | 1,0 b | 0,3 c | 1,6 b | 2,0 b | |
| U-NBPT-DCD | 146,7 b | 37,7 d | 76,7 b | 4,0 b | 9,0 c | 3,6 c | 0,5 c | 1,1 b | 0,5 c | 1,5 d | 2,0 | 1,9 c | 0,5 b | 0,5 b | 2,2 c | 1,6 b | 0,5 b | 1,2 b | 2,3 b | |
| SA | 284,3 a | 141,2 b | 211,7 a | 303,6 a | 355,9 a | 45,8 b | 72,0 b | 54,8 a | 3,9 c | 7,4 c | 6,9 | 1,7 c | 0,3 b | 0,8 b | 4,0 c | 2,0 b | 0,1 c | 1,3 b | 2,8 b | |
| SA-P | 83,5 c | 37,4 d | 13,2 c | 1,6 b | 3,2 c | 0,8 c | 1,1 c | 0,7 b | 3,7 c | 1,3 d | 1,5 | 3,4 c | 1,2 b | 0,5 b | 0,8 d | 1,4 b | 0,2 c | 0,8 b | 2,4 b | |
| SA-DCD | 255,1 a | 391,7 a | 229,1 a | 252,9 a | 109,7 b | 336,5 a | 173,3 a | 202,3 a | 174,6 a | 53,8 b | 21,8 | 94,1 b | 126,3 a | 2,4 a | 86,5 a | 31,6 a | 55,5 a | 54,9 a | 13,5 a | |
| | <i>Nitrato (mg N kg⁻¹)</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Controle | 10,8 f | 13,2 d | 13,2 d | 4,3 f | 8,5 d | 3,1 c | 8,7 d | 8,9 c | 4,7 e | 2,6 e | 1,7 c | 3,2 f | 8,2 e | 7,9 c | 9,9 e | 3,0 b | 1,3 d | 2,8 c | 6,4 c | |
| U | 52,9 c | 240,8 a | 279,1 a | 188,9 c | 192,2 | 124,0 b | 103,5 a | 66,9 a | 150,1 b | 60,9 c | 25,7 b | 50,7 d | 130,7 a | 23,7 b | 35,0 d | 4,3 b | 22,4 c | 4,2 c | 22,2 b | |
| U-P | 91,2 b | 162,7 b | 214,0 a | 251,7 b | 195,1 | 209,3 a | 65,5 b | 73,6 a | 67,0 c | 25,4 d | 14,2 b | 86,4 b | 16,1 e | 20,9 b | 65,8 c | 4,6 b | 29,4 c | 5,1 c | 10,9 c | |
| U-DCD | 21,8 e | 115,7 c | 79,6 b | 131,2 d | 170,9 | 114,9 b | 46,3 c | 72,7 a | 92,4 c | 87,1 b | 59,9 a | 65,7 c | 21,6 d | 14,9 b | 167,3 a | 5,1 b | 4,7 d | 14,5 b | 14,9 b | |
| U-NBPT | 84,8 b | 179,6 b | 207,9 a | 203,0 c | 140,2 | 144,6 b | 23,4 d | 45,8 a | 61,5 c | 56,8 | 35,9 a | 26,0 e | 33,8 c | 62,2 a | 20,7 e | 48,2 a | 28,6 c | 13,2 b | 38,3 a | |
| U-NBPT-DCD | 132,6 a | 197,8 b | 208,9 a | 487,0 a | 152,0 | 145,1 b | 73,4 b | 50,5 a | 38,2 d | 32,6 d | 22,9 b | 70,0 c | 24,6 d | 14,1 b | 10,3 e | 4,0 b | 6,1 d | 3,5 c | 23,2 b | |
| SA | 34,4 d | 98,0 c | 77,0 b | 139,8 d | 129,8 | 168,6 a | 62,1 b | 82,9 a | 123,2 b | 157,7 a | 71,6 a | 110,9 a | 12,8 e | 15,1 b | 51,9 c | 5,8 b | 71,8 a | 3,4 c | 13,9 b | |
| SA-P | 53,7 c | 84,9 c | 102,0 b | 177,6 c | 38,5 d | 99,0 b | 12,0 d | 26,6 b | 181,8 a | 9,4 e | 3,4 c | 5,7 f | 9,9 e | 6,4 c | 11,6 e | 12,6 b | 33,5 c | 1,4 c | 25,2 b | |
| SA-DCD | 13,6 f | 46,8 d | 45,8 c | 60,8 e | 78,8 c | 51,7 c | 20,2 d | 29,3 b | 66,6 c | 55,9 c | 21,4 b | 25,0 e | 51,4 b | 16,0 b | 91,0 b | 53,9 a | 53,1 b | 33,0 a | 36,5 a | |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: ausência de letras após médias não as difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

APÊNDICE 4 – ALTURA E DIÂMETRO DO COLO DAS MUDAS DE EUCALIPTO DO CAPÍTULO I

APÊNDICE 4 - ALTURA E DIÂMETRO DO COLO DE MUDAS DE EUCALIPTO AO FINAL DE 177 DIAS APÓS SEU PLANTIO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

| Dias após plantio | Controle | U | U-P | U-DCD | U-NBPT | U-NBPT-DCD | SA | SA-P | SA-DCD |
|------------------------------|----------|---------|---------|----------|---------|------------|----------|----------|----------|
| <i>Altura (cm)</i> | | | | | | | | | |
| 8 | 33,30 | 32,48 | 31,48 | 34,33 | 34,43 | 33,97 | 33,73 | 34,50 | 34,50 |
| 38 | 33,08 | 33,33 | 32,92 | 35,17 | 34,25 | 34,83 | 33,42 | 35,42 | 36,92 |
| 72 | 43,52 | 41,93 | 41,10 | 44,20 | 41,83 | 42,60 | 42,47 | 44,68 | 44,13 |
| 98 | 71,00 a | 59,00 b | 58,75 b | 67,17 a | 56,75 b | 60,83 b | 76,00 a | 71,00 a | 80,67 a |
| 132 | 116,14 a | 90,17 b | 97,45 b | 110,90 a | 85,64 b | 101,00 b | 129,42 a | 119,70 a | 136,64 a |
| 160 | 168,17 | 146,83 | 151,33 | 159,00 | 135,3 | 156,50 | 181,67 | 165,00 | 175,67 |
| 177 | 196,33 | 183,50 | 184,50 | 186,33 | 180,00 | 199,50 | 207,17 | 191,00 | 200,33 |
| <i>Diâmetro do colo (mm)</i> | | | | | | | | | |
| 8 | 3,50 | 3,54 | 4,11 | 3,74 | 3,7 | 4,00 | 4,01 | 4,33 | 4,40 |
| 38 | 3,55 | 3,43 | 4,10 | 4,08 | 3,87 | 4,24 | 4,08 | 4,31 | 4,19 |
| 72 | 4,24 b | 4,10 b | 4,38 b | 4,06 b | 4,49 b | 4,39 b | 4,68 a | 4,95 a | 5,08 a |
| 98 | 7,67 c | 6,44 c | 6,96 c | 7,51 c | 6,14 c | 7,02 c | 8,65 b | 8,11 b | 10,13 a |
| 132 | 15,15 a | 12,22 b | 13,34 b | 14,98 a | 11,61 b | 12,87 b | 15,78 a | 15,53 a | 17,11 a |
| 160 | 17,57 | 16,11 | 16,63 | 18,03 | 15,43 | 16,96 | 18,7 | 18,59 | 19,60 |
| 177 | 19,85 | 18,15 | 19,28 | 20,21 | 18,09 | 19,68 | 20,40 | 20,55 | 21,33 |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: ausência de letras após médias não as difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

APÊNDICE 5 – VOLUME DO CAULE DAS MUDAS DE EUCALIPTO DO CAPÍTULO I

APÊNDICE 5 - VOLUME DO CAULE (cm³) DE MUDAS DE EUCALIPTO AO FINAL DE 177 DIAS APÓS SEU PLANTIO EM VASOS COM LATOSSOLO VERMELHO, SENDO AS MUDAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS POLÍMEROS PARA LIBERAÇÃO CONTROLADA DE NITROGÊNIO (U-P), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), UREIA MAIS INIBIDOR DE UREASE N-(N-BUTIL)TIOFOSFÓRICO TRIAMIDA (U-NBPT), UREIA MAIS NBPT E DCD (U-NBPT-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA), SULFATO DE AMÔNIO MAIS POLÍMEROS (SA-P), E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). CASA DE VEGETAÇÃO, EMBRAPA FLORESTAS, COLOMBO-PR, 2017.

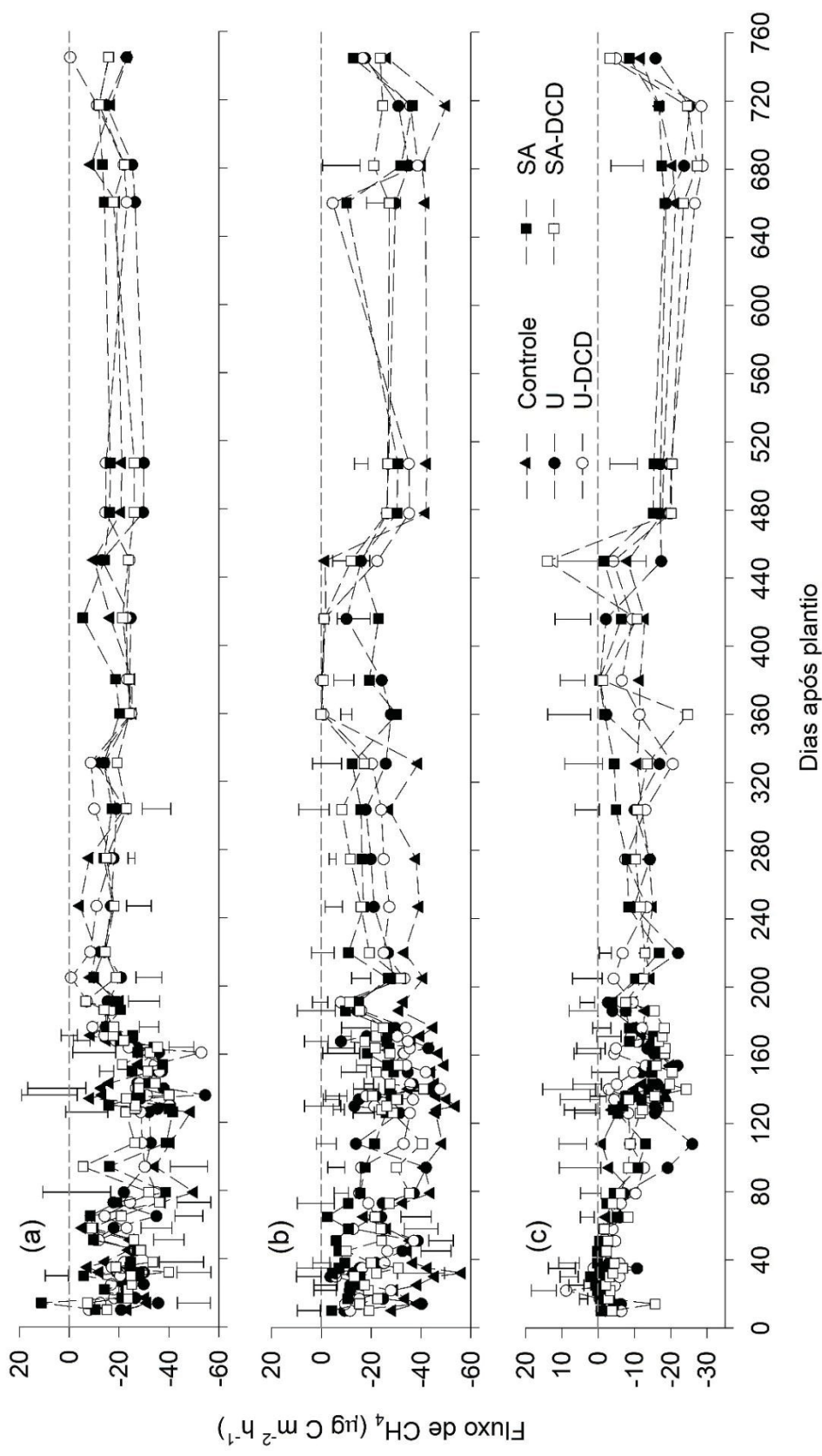
| Dias após plantio | Controle | U | U-P | U-DCD | U-NBPT | U-NBPT-DCD | SA | SA-P | SA-DCD |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|---------|------------|----------|----------|----------|
| 8 | 3,29 | 3,22 | 4,27 | 3,78 | 3,81 | 4,41 | 4,2 | 5,08 | 5,24 |
| 38 | 3,29 | 3,11 | 4,42 | 4,69 | 4,05 | 5,05 | 4,37 | 5,18 | 5,11 |
| 72 | 6,28 b | 5,62 b | 6,29 b | 5,73 b | 6,65 b | 6,48 b | 7,32 b | 8,63 a | 8,91 a |
| 98 | 33,00 c | 19,94 c | 22,79 c | 31,02 c | 16,76 c | 23,76 c | 45,33 b | 38,24 c | 65,30 a |
| 132 | 211,95 a | 110,79 b | 142,22 b | 210,95 a | 90,24 b | 130,29 b | 256,59 a | 225,12 a | 312,12 a |
| 160 | 411,43 | 312,33 | 330,00 | 410,21 | 256,55 | 357,07 | 504,93 | 451,53 | 531,85 |
| 177 | 608,44 | 488,98 | 538,96 | 597,37 | 474,09 | 609,03 | 679,88 | 636,46 | 716,66 |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: ausência de letras após médias não as difere estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

APÊNDICE 6 – FLUXOS DE CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO II

APÊNDICE 6 - FLUXOS DE METANO DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO (a), DA LINHA (b) E DA ENTRELINHA (c) DE PLANTIO DE EUCALIPTO, SENDO A ADUBAÇÃO REALIZADA COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA – PR, 2018 E 2019.



FONTE: A autora (2020).

LEGENDA: Barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

APÊNDICE 7 – EMISSÃO ACUMULADA DE CH₄ DO SOLO DO CAPÍTULO II

APÊNDICE 7 - EMISSÃO ACUMULADA DE METANO (NÃO PONDERADA E PONDERADA) DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO ADUBADO, DA LINHA E DA ENTRELINHA DE PLANTIO DE EUCALIPTO EM DOIS ANOS DE AVALIAÇÃO, SENDO AS PLANTAS ADUBADAS COM UREIA (U), UREIA MAIS INIBIDOR DE NITRIFICAÇÃO DICIANODIAMIDA (U-DCD), SULFATO DE AMÔNIO (SA) E SULFATO DE AMÔNIO MAIS DICIANODIAMIDA (SA-DCD). TELÊMACO BORBA- PR, 2018 E 2019.

| Tratamento | Ano 1 (2018) | | | | Ano 2 (2019) | | | |
|------------|---|-----------|------------|--------|--------------|-------------|-------------|----------|
| | Adubado | Linha | Entrelinha | Total | Adubado | Linha | Entrelinha | Total |
| | <i>Emissão não ponderada (mg C m⁻² ano⁻¹)</i> | | | | | | | |
| Controle | -175 B a | -305 C d | -81 A ab | nd | -159 A ab | -274 B c | -148,3 A ab | nd |
| U | -191 B a | -208 B c | -98 A b | nd | -219 B c | -224,3 B b | -138,3 A ab | nd |
| U-DCD | -155 B a | -199 C bc | -78 A ab | nd | -168 A b | -179,7 A a | -169,1 A b | nd |
| SA | -166 B a | -147 B a | -61 B ab | nd | -124 A a | -202,5 B ab | -113,3 A a | nd |
| SA-DCD | -176 B a | -168 B ab | -989 A b | nd | -190 B bc | -175,9 AB a | -145,2 A ab | nd |
| | <i>Emissão ponderada (mg C m⁻² ano⁻¹)</i> | | | | | | | |
| Controle | -8 A a | -119 C d | -45 B bc | -172 c | -10 A a | -104 B c | -83 C bc | -196 c |
| U | -9 A a | -82 C c | -55 B c | -146 a | -14 A a | -85 B b | -77 B ab | -176 bc |
| U-DCD | -7 A a | -77 C bc | -44 B ab | -128 b | -11 A a | -68 B a | -94 C c | -173 abc |
| SA | -8 A a | -57 C a | -34 B a | -100 b | -8 A a | -77 B ab | -63 C a | -148 a |
| SA-DCD | -9 A a | -66 C ab | -55 B bc | -130 b | -12 A a | -66 B a | -81 C bc | -160 ab |

FONTE: A autora (2020).

NOTA: Letras maiúsculas comparam locais para uma mesma fonte de nitrogênio e letras minúsculas comparam fontes de nitrogênio para um mesmo local, ambos pelo teste de Tukey (p<0,10); nd significa não determinado.