

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Manejo da Palhada da Cana-de-açúcar na
Região Sul e Sudeste Brasileira: Quantidade
Necessária para a Manutenção da Qualidade do Solo
e Produtividade Agrícola**

Iara Maria Lopes Rangel

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**MANEJO DA PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO
SUL E SUDESTE BRASILEIRA: QUANTIDADE NECESSÁRIA
PARA A MANUTENÇÃO DA QUALIDADE DO SOLO E
PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA**

IARA MARIA LOPES RANGEL

Sob a Orientação do Professor
Eduardo Lima

e Co-orientação da Professora
Érika Flávia Machado Pinheiro

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ
Junho de 2018

R196m Rangel, Iara Maria Lopes, 1987-
Manejo da palhada da cana-de-açúcar na região sul e sudeste brasileira: quantidade necessária para a manutenção da qualidade do solo e produtividade agrícola / Iara Maria Lopes Rangel. - 2018.
138 f.: il.

Orientador: Eduardo Lima.

Coorientadora: Érika Flávia Machado Pinheiro.

Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo, 2018.

1. Remoção da Palha da Cana-de-Açúcar. 2. Atributos do Solo. 3. Gases de Efeito Estufa. 4. Condições Edafoclimáticas. I. Lima, Eduardo, 1955-, orient. II.

Pinheiro, Érika Flávia Machado, 1975-, coorient. III

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo.

IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

IARA MARIA LOPES RANGEL

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

TESE APROVADA EM 18/06/2018.

Eduardo Lima. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Heroldo Weber. Dr. UFPR

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa

Nivaldo Schultz. Dr. UFRRJ

Juliano Bahiense Stafanato. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

A minha querida filha Yasmin Lopes Rangel.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao professor Eduardo Lima, pela orientação, amizade e apoio desde a minha graduação, por sempre estar disposto a me ouvir e amparar em todos os momentos, em especial nos de dificuldade.

À professora Érika Pinheiro, pela orientação, por me acolher em seu laboratório e pela boa convivência que tivemos ao longo desse trabalho.

Ao CNPq (Edital Universal, processo: 481691/2013-8) pelo apoio financeiro e pela bolsa de Doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo pelo apoio técnico, científico e financeiro.

Aos pesquisadores e técnicos da Fundação de Apoio da Universidade do Paraná (FUNPAR) pela parceria na condução do experimento em Colorado-PR, em especial ao Dr. Heroldo Weber.

À Embrapa Agrobiologia, em especial ao pesquisador Dr. Bruno Alves, à Dr. Andreia Loviane e ao Pós-doutorando Selenobaldo Alexinaldo Santanna, pelas sugestões, suporte e realização das análises de óxido nitroso e metano do solo.

Às Usinas LASA (Linhares-ES) e Alto Alegre (Colorado-PR), por cederem as áreas experimentais e mão de obra necessária para instalação e condução dos experimentos.

Aos funcionários do Campus Dr. Leonel Miranda pelas análises de determinação dos nutrientes nas partes da planta, principalmente, aos técnicos Geraldinho e Gilson por acompanhar e participar de todo trabalho em campo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por abrir boas portas a seus alunos, e a todos os professores e os colegas pelos seus princípios e conhecimentos compartilhados.

Às bolsistas Rafaela Martins, Rakyeli Martins e Melania Ziviani, e as estagiárias Gisele Ferreira e Juliana Diniz, por contribuírem fielmente na conclusão desse trabalho.

À doutoranda Camila Almeida e ao Luiz Alberto Pinto, por contribuírem de forma expressiva nas coletas de solo e gases do efeito estufa.

Aos professores Nivaldo Schultz e Fábio Freitas, à Dra. Adriana, ao Giovane e à Selma, ao Silver e demais pessoas que estiveram presentes nas coletas de campo pelo auxílio.

Ao professor Juliano Stafanato, por fazer toda coleta de campo no ano de 2015 e colaboração no ano de 2016.

Aos responsáveis pelos laboratórios do Departamento de Solos e seus integrantes, por cederem espaço e equipamentos para realização das análises, em especial aos professores Everaldo Zonta, Juliano Stafanato, Leandro Azevedo, Marcos Bacis Cedia, Marcos Gervasio Pereira e Sonia Regina.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Solos pela contribuição que dão diariamente de forma direta ou indireta as nossas dissertações e teses.

Ao meu esposo Rafael Passos Rangel, pelo apoio em todas as etapas desse trabalho, pelo carinho e companheiro.

Aos meus familiares pelo apoio ao longo da minha trajetória, em especial ao meu irmão (Paulo) pelo apoio e incentivo, a minha mãe (Fátima) e filha (Yasmin) que me deram muita força e energia positiva para finalização desse trabalho.

À Deus pela vida e oportunidade de concretizar mais um sonho.

Muito obrigada!

BIOGRAFIA

Iara Maria Lopes Rangel nasceu na cidade de Campestre – MG, no dia 5 de março de 1987. Em 2004 concluiu o ensino médio na Escola Estadual ‘Rui Barbosa’. Em 2007 ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrônoma da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, concluindo-o em 2012. Durante o período de graduação foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) no período de agosto de 2009 a janeiro de 2012. E no período de agosto a dezembro de 2011 exerceu como voluntária a monitoria da disciplina de Aptidão Agrícola e Manejo dos Solos desta instituição. Em março de 2012 ingressou no Mestrado no curso de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Após a conclusão do Mestrado, em 2014, ingressou no Doutorado no curso de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

RESUMO GERAL

RANGEL, Iara Maria Lopes. **Manejo da palhada da cana-de-açúcar na região sul e sudeste brasileira: quantidade necessária para a manutenção da qualidade do solo e produtividade agrícola.** 2018. 138f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

A remoção de parte da palha da cana-de-açúcar para geração de bioenergia ou álcool de segunda geração pode gerar saldo energético ainda mais positivo ao setor sucroalcooleiro. Contudo, a manutenção da palha sobre a superfície do solo contribui para manter a qualidade do solo e no rendimento de colmos. Assim, não se sabe ao certo a quantidade que pode ser retirada do sistema sem causar danos aos atributos do solo e a produtividade da cultura ao longo do tempo. O objetivo geral desse estudo é propor manejo sustentável de colheita da cana-de-açúcar para as regiões sul e sudeste do país; como específico recomendar quanto da palhada deve ser deixada na superfície do solo e quanto pode ser retirada para a co-geração de energia ou produção de álcool de segunda geração com menor prejuízo possível à segurança do solo. Foram conduzidos dois experimentos em duas regiões: Colorado-PR (Sul) em Latossolo Vermelho, sob espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 x 1,5 m); e Linhares-ES (Sudeste) em Argissolo Amarelo, com espaçamento simples (1,5 m). Foram avaliados quatro níveis de deposição da palha (0, 25, 50 e 100 %). Amostras de solo foram coletadas logo após a colheita da 1ª e 2ª soca. No primeiro momento foi amostrado o solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, para determinar C, N, pH, H+Al, Al, Ca, Mg, Na, K, P, fracionamento físico densimétrico (camadas 0-5 e 5-10 cm) e estabilidade de agregados (camada 0-10 cm). No segundo momento nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, para as mesmas avaliações anteriores mais a densidade e porosidade do solo. Câmaras estáticas e armadilhas tipo “Pitfall” foram instaladas nesses dois momentos para coleta de óxido nitroso e fauna invertebrada epigeica, respectivamente. As plantas foram também coletadas para avaliar produção de colmo e palha. A remoção total da palha (0%) é prejudicial a qualidade do solo, com efeito negativo na produtividade de colmos em ambas as regiões produtoras. Contudo, os impactos causados pelos níveis de palha são distintos entre as regiões. No Sul a manutenção de 50% de palha ($7,55 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) influencia positivamente o aporte de fração leve livre, C, N, atributos físicos do solo e rendimento de colmos. Porém, a manutenção de 100% de palha resulta em maior emissão acumulada de N_2O do solo e proporciona condições favoráveis a compactação do solo. No Sudeste o nível mais adequado de palha foi de 100 % ($9,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), o qual apresentou melhores valores de C, N, atributos químicos, físicos e biológicos do solo, e maior rendimento de colmos. Entretanto, a retirada total da palha (0%) foi a condição que favoreceu os maiores fluxos de N_2O , no Sudeste. Os resultados sugerem que o nível ideal de palha a ser mantido no campo depende das condições específicas de cultivo de cada região, o que impede uma única recomendação para todo o Brasil. Contudo, recomenda-se o acompanhamento do efeito de diferentes níveis de palha sobre a qualidade do solo, emissão de gases do efeito estufa e produtividade de colmos, ao longo do tempo, para definir com mais exatidão a quantidade mínima de palha que garanta sistema de produção de cana-de-açúcar sustentável em cada região de cultivo.

Palavras-chave: *Saccharum* spp. Remoção da Palha. Atributos do Solo. Gases de Efeito Estufa.

GENERAL ABSTRACT

RANGEL, Iara Maria Lopes. **Management of sugarcane straw in southern and southeastern Brazil: quantity needed to maintain soil quality and agricultural productivity.** 2018. 138p. (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

The removal of part of the sugarcane straw for bioenergy production or second generation alcohol can generate a more positive energy balance in the sugarcane industry. However, the maintenance of sugarcane straw on soil surface generally contributes to maintenance of soil quality and stem yield. Thus, the amount that can be withdrawn from the system without causing damage to soil attributes and crop productivity over time is uncertain. The general objective of this study is to propose a sustainable management of sugarcane harvesting for the southern and southeastern regions of Brazil. More specifically, to recommend how much of the straw should be left on the soil surface and how much can be withdrawn for the co-generation of energy or second-generation alcohol manufacture, with the least harm to soil safety. Two experiments were conducted in two regions: Colorado-PR (Southern) in an Oxisol under alternating double planting spacing (0.9 x 1.5 m), and in Linhares-ES (Southeast) under an Ultisol in single spacing (1.5 m). Four levels of straw deposition (0, 25, 50 and 100%) were evaluated. Soil was sampled right after the 1st and the 2nd ratoon harvesting. Soil was taken from the 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm layers for determination of C, N, pH, H + Al, Al, Ca, Mg, Na, K, P, densimetric physical fractionation (layers 0-5 and 5-10 cm) and stability of aggregates (layer 0-10 cm). In a second moment soil was sampled in the layers of 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm, for the same determinations of the first year plus soil density and porosity. Static chambers and Pitfall traps were installed at both moments for collection of nitrous oxide and epigeonic invertebrate fauna, respectively. Plants were sampled to determine the yield of thatch and straw. Total straw removal (0%) is detrimental to soil quality reflecting negatively on shoot yield in both producing regions. However, the impacts caused by straw levels are distinct across regions. In the southern, the maintenance of 50% of straw ($7.55 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) positively influences the contribution of the free light fraction, C, N, soil physical attributes and stem yield. However, the maintenance of 100% straw results in higher accumulated emission of N_2O from the soil and provides conditions favorable to soil compaction. For the Southeast the best level was 100% straw ($9.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), which had better values of C, N, chemical, physical and biological attributes in the soil, as well as higher yield of stems. However, total straw removal (0%) was the condition that favored the largest N_2O flows in the Southeast region. The results suggest that the ideal straw level to be maintained in the field depends on the specific growing conditions of each region, which prevents a single recommendation for the whole country. However, it is recommended to monitor the effect of different straw levels on soil quality, greenhouse gas emissions and yield of stems over time to more accurately define the minimum amount of straw that ensures a sustainable system production of sugar cane in each growing region.

Key words: *Saccharum* spp. Straw removal. Soil attributes. Greenhouse gases.

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante as socas 2014/2015 (1ª soca) e 2015/2016 (2ª soca), em área experimental pertencente à Usina Alto Alegre S/A, no município de Colorado (PR). 25
- Figura 2.** Detalhes da área experimental pertencente à Usina Alto Alegre S/A, em Colorado (PR) com a demonstração da aplicação dos tratamentos através do acúmulo e pesagem da palhada da cana-de-açúcar (A) e; o cultivo da cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado (0,9 X 1,5 m) (B)..... 26
- Figura 3.** Croqui do experimento com manejo da palhada da cana-de-açúcar em sistema de plantio com espaçamento duplo alternado (0,9 X 1,5 m), em Colorado– PR (Usina Alto Alegre S/A- 2014), instalado em 03/11/2014. Tratamentos: T1: cana colhida crua, com 100% de palha sobre a superfície do solo; T2: cana colhida crua, com 50% de palha sobre a superfície do solo (remoção de 50% da palhada); T3: cana colhida crua, com 25% de palha sobre a superfície do solo (remoção de 75% da palhada); T4: cana colhida crua, com 0% de palha sobre a superfície do solo (remoção de toda palhada)..... 27
- Figura 4.** Abertura de trincheiras nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar após a colheita mecanizada da cana-planta em Colorado –PR. As setas vermelhas identificam as paredes de coleta entre o espaçamento de 1,5 m e as amarelas identificam as paredes entre o espaçamento de 0,9 m. 31
- Figura 5.** Instalação das armadilhas “Pitfall” nas parcelas experimentais em Colorado -PR . 33
- Figura 6.** Câmara coletora de GEE inserida no solo no tratamento 2 (50% de palha sobre a superfície do solo), em Colorado (PR)..... 34
- Figura 7.** Produtividade de colmos frescos, em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m), com a variedade de cana-de-açúcar RB-867515, um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de experimento, com diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, em Colorado -PR. * significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo (p > 0,01). 36
- Figura 8.** Valores médios de cálcio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e magnésio (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = 0,000119x^2 - 0,014077x + 0,718864$, $r^2 = 0,99$. B: ⁽¹⁾ $y = 0,000181x^2 - 0,021423x + 1,456136$, $r^2 = 0,99$. C: ⁽¹⁾ $y = -0,000086x^2 + 0,006859x + 0,652045$, $r^2 = 0,999$; ⁽²⁾ $y = 0,000119x^2 - 0,010077x + 0,556136$, $r^2 = 0,99$. D: ⁽¹⁾ $y = -0,000139x^2 + 0,013777 + 0,666136$, $r^2 = 0,99$; ⁽²⁾ $y = -0,000105x^2 + 0,013836x + 0,696818$, $r^2 = 0,946$; ⁽³⁾ $y = -0,005486 + 0,79$, $r^2 = 0,80$; ⁽⁴⁾ $y = -0,0046x + 0,645$, $r^2 = 0,98$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 probabilidade teste t, respectivamente. 46
- Figura 9.** Valores médios de alumínio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e pH em água (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = -0,000162x^2 + 0,015807x + 0,459659$, $r^2 = 0,98$. B: ⁽¹⁾ $y = -$

$0,000087x^2 + 0,008582x + 0,048409$, $r^2 = 0,817$; $(2) y = -0,000102x^2 + 0,009107x + 0,112159$, $r^2 = 1,0$; $(3) y = -0,000179x^2 + 0,019316x + 0,144205$, $r^2 = 0,99$. C: $(1) y = 0,000105x^2 - 0,011507x + 5,517364$, $r^2 = 1,0$. D: $(1) y = 0,000100x^2 - 0,011111x + 5,626$, $r^2 = 0,97$, ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.....47

Figura 10. Valores médios de acidez potencial (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e sódio (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: $(1) y = -0,000182x^2 + 0,01495x + 1,63$, $r^2 = 0,93$; $(2) y = 0,000207x^2 - 0,022886x + 2,356818$, $r^2 = 0,99$. B: $(1) y = -0,000268x^2 + 0,027817x + 1,500159$, $r^2 = 0,94$; $(2) y = -0,000292x^2 + 0,02946x + 1,498841$, $r^2 = 0,83$; $(3) y = -0,000249x^2 + 0,028216x + 1,584682$, $r^2 = 0,99$; $(4) y = -0,000198x^2 + 0,017387x + 1,813659$, $r^2 = 0,64$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente..... 48

Figura 11. Valores médios de potássio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e fósforo assimilável (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: $(1) y = -0,123289x + 46,9545$, $r^2 = 0,67$; B: $(1) y = 0,168683x + 40,6495$, $r^2 = 0,79$; $(2) y = -0,120854x + 48,548$, $r^2 = 0,57$. C: $(1) y = -0,29502x + 34,899$, $r^2 = 0,845$; $(2) y = -0,066931x + 13,3295$, $r^2 = 0,60$; $(3) y = 0,000254x^2 - 0,030215x + 1,599727$, $r^2 = 0,57$. D: $(1) y = 0,002713x^2 - 0,314656x + 11,553318$, $r^2 = 0,97$; $(2) y = 0,001141x^2 - 0,114003x + 4,049636$, $r^2 = 0,95$; $(3) y = 0,000362x^2 - 0,025738x + 1,262886$, $r^2 = 0,99$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 probabilidade pelo teste t, respectivamente.50

Figura 12. Teores de carbono orgânico do solo ($g\ kg^{-1}$) em diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado - PR.....52

Figura 13. Teores de nitrogênio total do solo ($g\ kg^{-1}$) diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado - PR.....54

Figura 14. Relação carbono/nitrogênio (C:N) diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR.....55

Figura 15. Teores de carbono orgânico do solo ($g\ kg^{-1}$) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR.....57

Figura 16. Teores de nitrogênio total do solo ($g\ kg^{-1}$) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B,

respectivamente), avaliados dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR.....	58
Figura 17. Relação carbono/nitrogênio (C:N) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR.....	59
Figura 18. Frações leves da matéria orgânica do solo (FL) na camada de 0-5 cm (A, B) e na de 5-10 cm (C e D), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliadas um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR...	65
Figura 19. Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo, na camada de 0-10 cm, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 X 1,5 m) de cana-de-açúcar, avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. ** Significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste t, ns = não significativo.....	66
Figura 20. Valores médios de densidade do solo (DS), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR	68
Figura 21. Valores médios de e porosidade total calculada (P) (A e B), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR.....	69
Figura 22. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N ₂ O, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).	71
Figura 23. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).....	72
Figura 24. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR.....	73
Figura 25. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N ₂ O, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).	74
Figura 26. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).	75
Figura 27. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR.....	76
Figura 28. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, no período chuvoso, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar cultivada em espaçamento duplo combinado, em Colorado-PR.....	76

- Figura 29.** Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistema duplo combinado dois anos após a instalação de diferentes níveis de palhada, em Colorado-PR. 77
- Figura 30.** Número total de indivíduos da fauna invertebrada, dois anos após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar cultivada em espaçamento duplo combinado, em Colorado –PR. 78
- Figura 31.** Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, dois anos após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar em sistema duplo combinado em diferentes níveis de palhada, em Colorado -PR 79
- Figura 32.** Precipitação pluviométrica durante as socas 2015/2016 (1ª soca) e 2016/2017 (2ª soca), em área experimental com diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar após a colheita, em Linhares-ES. 87
- Figura 33.** Abertura de trincheiras, em área de cultivo de cana-de-açúcar após a colheita mecanizada da cana-planta em Linhares-ES, para caracterização química e física do solo até 100 cm de profundidade. 93
- Figura 34.** Aplicação de lâminas d'água no interior das câmaras estáticas e em área igual à da câmara, ao seu lado, em Linhares-ES, no período de coleta de gases do efeito estufa..... 95
- Figura 35.** Produtividade de colmos frescos, da variedade de cana-de-açúcar RB-867515, um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de experimento, com diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, em Linhares-ES. * significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo ($p > 0,01$). 96
- Figura 36.** Atributos químicos do solo (significativamente influenciados) um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em Linhares-ES. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. 101
- Figura 37.** Valores médios de cálcio (A), magnésio (B), e alumínio trocáveis (C), e pH em água (D), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Análise de regressão significativas: A: $(1) y = 0,007877x + 1,0735$, $r^2 = 0,93$; $(2) y = -0,000133x^2 + 0,016494x + 0,9883$, $r^2 = 0,83$. B: $(1) y = 0,000145x^2 - 0,012812x + 1,02009$, $r^2 = 0,72$; $(2) y = -0,000123x^2 + 0,013685x + 0,58925$, $r^2 = 0,88$. D: $(1) y = -0,002294x + 5,621$, $r^2 = 0,715$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. 103
- Figura 38.** Valores acidez potencial (A), sódio (B) e potássio (C) trocáveis, e fósforo assimilável (D), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Análise de regressão significativas: A: $(1) y = -0,000249x^2 + 0,021735x + 1,44175$, $r^2 = 0,92$; $(2) y = -0,000217x^2 + 0,02393x + 1,3445$, $r^2 = 0,77$. D: $(1) y = -0,001475x^2 + 0,15754x + 2,3775$, $r^2 = 0,94$. ** Significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. 105
- Figura 39.** Distribuição do teor de carbono orgânico (A) e nitrogênio total (B) em profundidade no solo, em área de cana-de-açúcar, avaliada dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha sobre a superfície de Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. .. 107
- Figura 40.** Valores médios de densidade do solo (DS) (A) e porosidade total (P) (B), avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES 109

Figura 41. Frações leves da matéria orgânica do solo (FL) na camada de 0-5 cm (FLL5 e FLI5) e na de 5-10 cm (FLL10 e FLI10), avaliadas um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	110
Figura 42. Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), na camada de 0-10 cm, avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. *** Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, ns = não significativo.....	111
Figura 43. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N ₂ O, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).....	113
Figura 44. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).....	114
Figura 45. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	115
Figura 46. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N ₂ O, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).....	116
Figura 47. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha ⁻¹ , fonte: sulfato de amônio).....	117
Figura 48. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	118
Figura 49. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, um ano após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar, em Linhares- ES (agosto de 2016).....	118
Figura 50. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, um ano após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palhada em Linhares- ES (agosto de 2016).	120
Figura 51. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, dois anos após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar, em Linhares- ES (setembro de 2017).	121
Figura 52. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, dois anos após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palhada em Linhares- ES (setembro de 2017)	122

INDICE DE TABELAS

Tabela 1. Principais atributos morfológicos do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado-PR.....	28
Tabela 2. Granulometria, argila dispersa em água, grau de flocculação e relação silte/argila do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado –PR.....	29
Tabela 3. Densidade do solo, densidade da partícula e porosidade total do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado –PR.	29
Tabela 4. Atributos químicos, teor de carbono orgânico e valores do complexo sortivo do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado -PR.....	29
Tabela 5. Análise tecnológica do caldo e colmo de cana-de-açúcar da variedade RB86-7515 cultivada em sistema duplo combinado (0,9 x 1,5 m), em 1ª soca, sob diferentes níveis de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100 %).	38
Tabela 6. pH em água, acidez potencial, alumínio trocável e cálcio mais magnésio trocáveis, em solo sob cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m) e sob vegetação de mata, em Colorado –PR.....	39
Tabela 7. Potássio trocável, fósforo disponível e carbono orgânico total do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado –PR	40
Tabela 8. Valores médios de pH, acidez potencial, alumínio e sódio trocáveis, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar, nos dois espaçamentos (0,9 e 1,5 m) do cultivo duplo alternado, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR	43
Tabela 9. Valores médios de cálcio, magnésio, e potássio trocáveis, e fósforo disponível, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar, nos dois espaçamentos (0,9 e 1,5 m) de cultivo duplo alternado, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR	44
Tabela 10. Granulometria do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado –PR.....	61
Tabela 11. Atributos físicos do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado-PR.....	62
Tabela 12. Número médio de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, em diferentes níveis de palhada (Colorado - PR, out. 2015).....	78
Tabela 13. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Colorado - PR, julho. 2016).....	80
Tabela 14. Principais atributos morfológicos do perfil do solo da área de estudo em Linhares-ES.....	90
Tabela 15. Granulometria, argila dispersa em água (ADA), grau de flocculação (GF) e relação silte/argila do perfil do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	91
Tabela 16. Densidade do solo, densidade da partícula e porosidade total do perfil do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.	91

Tabela 17. Atributos químicos e valores do complexo sortivo do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	92
Tabela 18. Atributos químicos do solo Argissolo Amarelo, em área de cana-de-açúcar após a colheita de cana-planta, em Linhares-ES.....	97
Tabela 19. Valores médios de pH, acidez potencial, alumínio e sódio trocáveis, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.	99
Tabela 20. Valores médios de cálcio, magnésio, e potássio trocáveis, e fósforo disponível, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.....	100
Tabela 21. Atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente (sem queima), no tempo zero (antes da instalação do experimento), em Linhares-ES	108
Tabela 22. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Linhares - ES, agosto de 2016).....	119
Tabela 23. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Linhares - ES, setembro de 2017).....	122

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	REVISÃO DE LITERATURA GERAL.....	4
2.1	Mudanças Climáticas Globais e Agricultura	4
2.2	Sistemas de Manejo de Cultivo da Cana-de-Açúcar e Emissões de GEE.....	5
2.3	Transformações do Nitrogênio no Solo.....	6
2.4	Manejo da Palhada da Cana-de-Açúcar.....	9
• 2.4.1	Remoção da palhada e dinâmica da MOS	10
• 2.4.2	Remoção da palhada e propriedades químicas do solo	13
• 2.4.3	Remoção da palhada e qualidade física do solo	14
• 2.4.4	Remoção da palhada e atributos biológicos do solo	17
3	CAPÍTULO I.....	20
	MANEJO DE PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR E QUALIDADE DO SOLO, PRODUÇÃO DA CULTURA E EMISSÃO DE N₂O EM COLORADO-PR.....	20
3.1	RESUMO.....	21
3.2	ABSTRACT	22
3.3	INTRODUÇÃO.....	23
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
• 3.4.1	Descrição da área experimental.....	25
• 3.4.2	Histórico do uso e manejo da área.....	25
• 3.4.3	Tratamentos e delineamento experimental.....	26
• 3.4.4	Caracterização do perfil do solo em Colorado-PR	27
• 3.4.5	Produtividade e parâmetros tecnológicos	30
• 3.4.6	Caracterização das propriedades químicas e físicas do solo	30
• 3.4.7	Carbono e nitrogênio no solo.....	31
• 3.4.8	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	31
• 3.4.9	Estabilidade de agregados	32
• 3.4.10	Fauna do solo.....	32
• 3.4.11	Coleta de gases de efeito estufa e solo	33
• 3.4.12	Adubação da cana-de-açúcar	34
• 3.4.13	Interpretação dos dados e avaliação estatística.....	35
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
• 3.5.1	Produtividade e parâmetros tecnológicos	36
• 3.5.2	Propriedades químicas do solo no tempo zero	38
• 3.5.3	Propriedades químicas do solo com um e dois anos de experimento.....	41
• 3.5.4	Carbono e nitrogênio no solo.....	51
• 3.5.5	Propriedades físicas do solo no tempo zero.....	60
• 3.5.6	Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo	63
• 3.5.7	Agregação do solo	66
• 3.5.8	Densidade e porosidade	67
• 3.5.9	Emissão de óxido nitroso.....	69
• 3.5.10	Fauna do solo.....	76
3.6	CONCLUSÕES	81

4	CAPÍTULO II	83
	MANEJO DA PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR E QUALIDADE DO SOLO, PRODUÇÃO DA CULTURA E EMISSÃO DE N₂O EM LINHARES-ES	83
4.1	RESUMO.....	84
4.2	ABSTRACT	85
4.3	INTRODUÇÃO.....	86
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	87
• 4.4.1	Descrição da área experimental.....	87
• 4.4.2	Histórico de uso e manejo da área.....	87
• 4.4.3	Tratamentos e delineamento experimental.....	88
• 4.4.4	Caracterização dos perfis do solo em Linhares-ES.....	88
• 4.4.5	Produtividade e parâmetros tecnológicos.....	93
• 4.4.6	Caracterização das propriedades químicas e físicas do solo.....	93
• 4.4.7	Carbono e nitrogênio no solo.....	94
• 4.4.8	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	94
• 4.4.9	Estabilidade de agregados.....	94
• 4.4.10	Fauna do solo.....	94
• 4.4.11	Coleta de gases de efeito estufa e solo.....	94
• 4.4.12	Adubação.....	95
• 4.4.13	Interpretação dos dados e avaliação estatística.....	95
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
• 4.5.1	Produtividade e parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar.....	96
• 4.5.2	Propriedades químicas do solo tempo zero.....	97
• 4.5.3	Propriedades químicas do solo um e dois anos após a instalação do experimento.....	97
• 4.5.4	Carbono e nitrogênio no solo.....	106
• 4.5.5	Caracterização das propriedades físicas do solo antes da implantação do experimento.....	107
• 4.5.6	Porosidade total e densidade do solo.....	108
• 4.5.7	Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo.....	110
• 4.5.8	Agregação do solo.....	111
• 4.5.9	Emissão de óxido nitroso.....	112
• 4.5.10	Fauna do solo.....	118
4.6	CONCLUSÕES.....	123
5	CONCLUSÕES GERAIS	124
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1 INTRODUÇÃO GERAL

O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área colhida de 8,77 milhões de hectares na última safra (2017/2018) resultando na produção de 39,39 milhões de toneladas de açúcar e 26,12 bilhões de litros de etanol. A cana-de-açúcar, em termos ambientais, também coloca o Brasil em condições de destaque. É matéria-prima para a produção de biocombustível (etanol), açúcar, vinhaça, energia elétrica, produção de gás carbônico (CO₂) puro. O balanço energético total da produção de etanol no país é de, aproximadamente, 10:1, ou seja, para cada unidade de energia fóssil consumida produz-se em torno de 10MJ de energia renovável. Isso ocorre, principalmente, devido ao uso do bagaço e da palhada da cana para produção de energia térmica, que é utilizada no processamento das atividades de produção das usinas, tornando-as autossuficientes e ainda gera um excedente para a comercialização. Mais recentemente, algumas usinas têm produzido e comercializado o gás CO₂ puro que é utilizado em refrigerantes, cervejas e bebidas gaseificadas, no tratamento de efluentes, em extintores de incêndio e até em aplicações medicinais.

Ainda do ponto de vista ambiental, o balanço dos gases de efeito estufa (GEE) indica que um veículo usando etanol de cana-de-açúcar emite 76,7% menos de CO₂ equivalente que o mesmo veículo rodando no mesmo percurso com gasolina pura (Díaz et al., 2010). Caso o veículo use gasolina no padrão brasileiro emitirá 18,5% menos de GEE do que a gasolina convencional (sem adição de álcool).

A cana-de-açúcar é uma cultura estratégica do ponto de vista econômico e ambiental. Um dos grandes desafios é continuar a meta de atingir parâmetros cada vez melhores com relação ao balanço energético da cultura para que a produção de açúcar e etanol seja cada vez mais sustentável, mas, sem deixar de se preocupar com a manutenção e/ou promoção da segurança do solo. Além do manejo da palhada, o manejo da adubação de plantio e das soqueiras, em especial da adubação nitrogenada, controle de pragas e doenças, a seleção de cultivares, o espaçamento de plantio, o controle de tráfego de máquinas e o tipo de preparo do solo são fatores que se adotados de maneira adequada contribuem na longevidade e produtividade dos canaviais e no balanço energético positivo da cultura.

Com relação aos sistemas de manejo da cultura, atualmente, a forma mais adotada de colheita da cana-de-açúcar é a mecânica, com 90 % das áreas de cultivo sendo colhida por máquinas colheitadeiras sem a prévia queima da palhada (Conab, 2017). Um dos principais fatores para a adoção desse sistema de colheita é a legislação ambiental que trata sobre a restrição e não uso do fogo antes da colheita, associada as colhedoras mecânicas, que foram adaptadas para essa nova realidade de cortar e espalhar a palhada da cana no campo ou recolher para produção de energia. Nesse sistema de colheita sem a queima da palhada são depositados sobre os solos, em média, de 10 a 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca de palha de cana-de-açúcar (Shultz et al., 2010). Essa grande quantidade de resíduos sobre o solo tem chamado a atenção dos produtores para o recolhimento de parte ou da totalidade da palhada da cana para a produção de bioenergia e/ou álcool de segunda geração.

A taxa de acúmulo de carbono no solo em sistema com manutenção da palha da cana-de-açúcar é dependente principalmente das condições edafoclimáticas de cada região de cultivo e do tempo de implantação do sistema. Mas, em média o acúmulo é de 1,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (Cerri et al., 2011). Geralmente, as frações mais lábeis da matéria orgânica do solo são mais sensíveis que o carbono orgânico do solo às mudanças dos sistemas de manejo adotado, indicando respostas ou caminhos mesmo a curto prazo.

A palha da cana-de-açúcar contribui com a ciclagem de nutrientes no sistema solo-planta, a fertilidade e biota do solo. A maior densidade e diversidade da fauna do solo geralmente é observada em condições de manejo mais conservacionista, pois esses invertebrados do solo são altamente sensíveis a alterações de umidade e/ou oferta de alimentos no solo. A manutenção e/ou o aumento dos estoques de C no solo contribuem na mitigação das emissões de GEE, assim como, a ausência da queima do canavial no momento da colheita.

A maior retenção da umidade do solo devido à manutenção da palha é responsável pelo maior rendimento de colmos, principalmente, em regiões que apresentam restrições hídricas ao longo do ano. A camada densa de palha também diminui a erosão hídrica, sendo um processo de degradação que ocorre com muita frequência nas lavouras canavieiras.

Porém, a maior umidade do solo no momento da colheita mecânica pode aumentar a compactação do solo. A perda da qualidade física do solo está sendo comum em áreas que recebem o tráfego intenso de máquinas. Sendo aconselhável a realização da colheita e dos tratamentos culturais apenas no “estado de sazão”, ponto de umidade ideal para a entrada da máquina no campo. Essa condição é mais comum na região centro sul do país, onde os índices pluviométricos elevados dos meses de setembro, outubro e novembro, ainda coincidem com o período de colheita das usinas da região. A substituição do sistema de colheita da cana queimada e manual pela colheita mecanizada pode refletir de forma negativa na estrutura do solo e, conseqüentemente na produtividade da cultura.

Além disso, em geral a emissão de óxido nitroso (N_2O) em sistema com manutenção da palha na superfície do solo e com adubação nitrogenada, é superior quando comparado com o sistema em que toda a palhada é removida do solo (Carmo et al., 2013). O que indica a necessidade de estudos que contabilizem o balanço entre a emissão de GEE e aporte de C no solo, com diferentes níveis de palha e em condições edafoclimáticas de cultivo, o que permite a averiguação do nível de palha mais recomendado em cada cenário.

As usinas de diferentes regiões de cultivo do país têm recomendado o recolhimento de 50% de palha da cana-de-açúcar. Mas, sem o respaldo de estudos que comprovem a eficiência efetiva dessa prática sobre a qualidade do solo e sustentabilidade da cultura. Visto que os poucos estudos com essa abordagem são de experimentos de curta duração e não abrangem diferentes condições edafoclimáticas de cultivo.

A grande extensão territorial nacional e conseqüentemente, as variações de clima, biomas e solos não permite que seja feita uma única recomendação de quantidade de palhada a ser deixada na superfície do solo para os diferentes biomas visando a manutenção da qualidade do solo, bem como, maior produtividade e longevidade dos canaviais.

Assim, as hipóteses desse trabalho são:

- a. A remoção total da palha da cana-de-açúcar da superfície do solo, para a co-geração de energia e/ou produção de álcool de segunda geração, influencia negativamente na qualidade química, física e biológica do solo, e na produtividade da cana, podendo contribuir para a redução nos teores de C e N;
- b. A quantidade de palhada de cana-de-açúcar deixada no sistema agrícola influencia na dinâmica do carbono e nitrogênio no solo e na emissão de N_2O ;
- c. As condições edafoclimáticas das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil atuam de forma diferenciada na taxa de decomposição da palhada, o que interfere no balanço e na localização da matéria orgânica (compartimento ativo e estável) no solo e conseqüentemente, na produtividade do sistema ao longo do tempo e;
- d. Em condições de plantio duplo combinado (0,9 x 1,5 m), amplamente adotado na região centro-sul de produção de cana, os atributos químicos e físicos do solo apresentam

comportamentos distintos nas linhas com tráfego (0,9 m) e sem tráfego (1,5 m) em relação aos níveis de palha da cana-de-açúcar.

O objetivo geral desse estudo foi avaliar o efeito da retirada de diferentes percentuais de palha de cana-de-açúcar na qualidade do solo, na emissão de GEE e na produtividade da cultura em diferentes condições de cultivo: na região sul (Colorado-PR, Capítulo I) e sudeste (Linhares-ES, Capítulo II) do país.

2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1 Mudanças Climáticas Globais e Agricultura

O elevado crescimento populacional no mundo e o maior poder de compra dos países em desenvolvimento tem aumentado, de maneira significativa, a demanda por alimentos e energia no mundo. Como consequência, observa-se o acréscimo da emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido, principalmente, ao aumento do uso de combustíveis fósseis e a exploração de novas áreas agrícolas.

Os principais efeitos do aumento da emissão desses gases na atmosfera são o aumento global na temperatura do ar e dos oceanos, derretimento de gelo e neve em larga escala, e a elevação do nível dos mares e oceanos. Assim, ainda para esse século, caso não ocorra uma redução das taxas de emissões de GEE, segundo IPCC-AR5 (2014) espera-se um aumento da temperatura do planeta de até 4,8° C e uma elevação do nível do mar de até 82 cm, o que acarretaria sérios danos nas regiões costeiras. Os principais GEE que têm contribuído no aquecimento global do planeta são (dióxido de carbono - CO₂, metano - CH₄ e óxido nitroso - N₂O) (IPCC-AR5, 2014). Diante desse cenário, diversos centros de pesquisa têm investigado e buscado consolidar as principais estratégias que contribuem, efetivamente, na diminuição da taxa de emissão de GEE.

As emissões antrópicas dos GEE ocorrem em vários setores de atividades, sendo os principais contribuintes, estimados em níveis decrescentes de emissão no ano de 2015, os setores de energia, agropecuária e uso da terra, mudança de uso da terra e florestas, com emissões em carbono equivalente de 449.407,0; 428.904,0 e 331.806,0 Gg, respectivamente. Esses dados são do último relatório do Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2016). Ao comparar os mesmos com os dados dos anos anteriores, em especial com os de 2004, nota-se que o setor uso da terra, mudança de uso da terra e florestas apresentou uma queda nos valores de emissões em 87,4 % graças principalmente a queda do desmatamento (-79%) em território nacional.

Assim, o Brasil reduziu consideravelmente suas emissões nessa última década. Entretanto, os setores de energia e agricultura, apresentaram um padrão de crescimento, sendo esses responsáveis atualmente por 64% (878.311,0 Gg CO₂ equivalente) das emissões GEE no país (MCTIC, 2016).

No setor energia as principais alternativas que contribuem na mitigação das emissões de GEE são expansão da oferta hidroelétrica, de fontes alternativas renováveis (centrais eólicas, pequenas centrais hidroelétricas e bioeletricidade), expansão da oferta de biocombustíveis e energia solar e o incremento da eficiência energética. Destacando-se nesse sentido a produção de cana-de-açúcar, principalmente em sistema de colheita sem queima, pois, além da produção de etanol (26,12 bilhões de litros) (Conab, 2017), também fornece matéria prima (principalmente bagaço) para produção de bioenergia (11.223.890 KW) (ANEEL, 2017).

A produção de bioenergia advinda da cana-de-açúcar pode ser ainda maior quando se utiliza não só o bagaço, mas também a palha da cana-de-açúcar (Leal et al., 2013). Entretanto, a manutenção da palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, em sistemas sem queima, também é uma prática que têm contribuído na mitigação das emissões de GEE graças ao acréscimo de C no solo (Satiro et al., 2017; Thorburn et al., 2012; Pinheiro et al., 2010; Galdos et al., 2009), o que contribui na mitigação das emissões do setor agricultura.

Nesse sentido, o Brasil vem se destacando nas pesquisas na área de aquecimento global e mais recentemente, através do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

(MAPA) e do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) publicou o “Plano ABC” (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Este Plano é uma importante parte do compromisso de reduzir as emissões de GEE, assumido pelo Brasil na 15ª Conferência das Partes – COP15 ocorrida em Copenhague, no ano de 2009.

O Plano ABC é composto de sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação, e ainda um último programa com ações de adaptação às mudanças climáticas: Programa 1) Recuperação de pastagens degradadas; Programa 2) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e Sistemas Agroflorestais; Programa 3) Sistema Plantio Direto; Programa 4) Fixação Biológica de Nitrogênio; Programa 5) Florestas Plantadas; Programa 6) Tratamentos de Dejetos Animais e Programa 7) Adaptação as Mudanças Climáticas. A adoção conjunta dessas ações tem sido responsável por diminuir as emissões em escalas ainda maiores que as firmadas no acordo de redução de emissão até 2020 (MCTIC, 2016).

2.2 Sistemas de Manejo de Cultivo da Cana-de-Açúcar e Emissões de GEE

No Brasil, a cana-de-açúcar ocupa, aproximadamente, 8,77 milhões de hectares (Conab, 2017) de um total de 68,1 milhões de hectares destinados à agricultura (IBGE, 2012), o que corresponde a, aproximadamente, 12,9 % de toda a área plantada e destinada à colheita no país. A produtividade média de colmos, dos estados produtores na safra 2017/2018 foi estimada em 73,7 Mg ha⁻¹, sendo produzidos nessa safra 39,39 milhões de toneladas de açúcar e 26,12 bilhões de litros de etanol (Conab, 2017).

A cultura da cana-de-açúcar, em termos de balanço energético, destaca-se como uma das fontes de energia renovável mais viável do mundo, pois apresenta uma elevada produção de biomassa com um baixo requerimento de adubação nitrogenada (Urquiaga et al., 2005). O balanço energético estabelece a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida em todo o processo de produção do mesmo, incluindo-se o processo agrícola e industrial. A cana-de-açúcar apresenta um balanço energético altamente positivo, em média 8,7. Pois, são necessários 19,98 GJ ha⁻¹ ano⁻¹ para sustentar 1 ha ano⁻¹ de cana-de-açúcar e todo o processo de destilação na usina que, em média, resulta em 7224 L de etanol, considerando uma produtividade de 84 Mg de cana fresca ha⁻¹ ano⁻¹, o que corresponde a um valor calorífico de 161,1 GJ. Esse balanço energético altamente positivo somente consagrou-se após a substituição do uso de energia fóssil por bagaço da cana, na geração de energia, a qual ocorreu de forma mais abundante a partir da década de 90 (Dantas Filho, 2009).

Contudo, mudanças continuam ocorrendo no setor sucroalcooleiro, como a consolidação da eliminação do uso do fogo, como método despalhador e facilitador do corte, em boa parte dos canaviais, o que contribui com a diminuição da emissão GEE. Bordonal et al. (2012) estimaram, para a região sudeste do Brasil, um balanço de GEE em termos de CO₂ equivalente (incluindo o solo como um possível reservatório de carbono), a partir da emissão de N₂O após adubação nitrogenada com diferentes fontes (mineral, orgânica - aplicação de vinhaça e torta de filtro, e resíduos – palhada da cana e crotalaria), da emissão de N₂O e CH₄ no processo de queima da palhada, da aplicação de calcário, pesticida e a partir do consumo de diesel nas operações agrícolas, isso em 4 cenários de produção de cana-de-açúcar, a saber: cana com colheita manual após a queima e com preparo convencional do solo na reforma do canavial (S0); sistema de colheita mecanizada sem queima com preparo convencional (S1); sistema de colheita mecanizada sem queima com uso de preparo reduzido para a reforma do canavial (S2); e sistema de colheita mecanizada sem queima com uso de preparo reduzido, além da introdução de uma rotação de culturas com *Crotalaria juncea* L., durante a reforma

do canavial (S3) e, verificaram que a emissão de GEE desses cenários foi de 2651,9; 1428,3; 1180,3 e 1064,6 kg de CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

A partir desse trabalho observa-se que os principais fatores que contribuíram na mitigação da emissão de GEE foram a conversão do sistema com queima da palhada em sistema sem queima, pois a queima da palhada emite em média 883,6 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ e deixa de acumular no solo 888,1 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ e, o tipo de preparo do solo na renovação do canavial, onde o preparo reduzido emite 201,7 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ a menos que o preparo convencional. Segundo Silva-Olaya et al. (2013), o sistema de preparo convencional do solo resulta em emissões de 350,09 g m⁻² de CO₂ para a atmosfera, valor que sugere uma perda de 80% do C que pode ser estocado na camada 0-20 cm do solo como resultado da adoção de colheita sem queima da palhada. A perda de carbono no solo em sistema convencional de preparo do solo é 12 e 2% maior do que as observadas sob preparo reduzido e cultivo mínimo do solo, respectivamente.

A adoção do preparo reduzido do solo no plantio da cana-de-açúcar, aliado à colheita sem queima, resulta numa retenção de carbono de 0,96 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ a mais que o preparo convencional, mostrando-se uma estratégia eficiente a manutenção da palhada na superfície do solo ao longo dos ciclos de cultivo (Segnini et al., 2013).

Entretanto, as emissões de CO₂ do solo não são contabilizadas na elaboração dos inventários de emissão de GEE na agricultura porque o CO₂ emitido pelo solo provém da respiração das raízes das plantas e da atividade microbiana de decomposição, representando, portanto, o carbono que está ciclando no ambiente (Signor et al., 2014). Assim, o balanço de C em diferentes usos do solo ou condições de manejo deve ser feito em estudos de longo prazo, considerando a variação nos estoques desse elemento no solo ao longo do tempo.

2.3 Transformações do Nitrogênio no Solo

A maior parte do nitrogênio total da superfície dos solos agrícolas (mais de 90%) encontra-se em combinações orgânicas (Yamada & Abdalla, 2000). Enquanto permanece nesta forma, o N está relativamente seguro das perdas, exceto por erosão, que em sistema de manejo que mantém a palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo é bem controlada. Entretanto, esse estoque de N-orgânico está sujeito ao processo de mineralização, sendo convertido em amônio (NH₄⁺) que, posteriormente, pelo processo microbiológico de nitrificação é transformada em nitrito (NO₂⁻) e posteriormente nitrato (NO₃⁻) (Megda et al., 2012).

Para atender a demanda de N pela cultura da cana-de-açúcar elevadas doses de N fertilizante tem sido aplicadas nos canaviais, principalmente nas soqueiras. São aplicadas doses de adubo nitrogenado que variam de 80 kg ha⁻¹ a 120 kg ha⁻¹ de N, na grande maioria utilizando-se a ureia (Costa et al., 2003). Essa é uma das principais fontes de adubo nitrogenado que contribuem no aumento das perdas de N no sistema. Pois, parte desse N aplicado é perdido através da volatilização da amônia (NH₃), sendo esse processo mediado pela presença da enzima urease no solo, que é capaz de catalisar a hidrólise da ureia em dióxido de carbono e amônia (Da Ros et al., 2005).

A diminuição do potencial de perdas de nitrogênio ocorre quando o gás amônia passa para o íon amônio (NH₄⁺), sendo esse processo dependente do pH em torno do grânulo da ureia e da umidade do solo. Essa passagem é intensificada pela difusão da amônia no solo e depende da textura, porosidade, umidade e da capacidade do solo em reter o amônio. Uma das práticas que contribuem para minimizar a volatilização da amônia é a incorporação da ureia ao solo, mas em sistemas de plantio direto e em áreas de produção de cana-de-açúcar que mantém a palhada sobre a superfície do solo, essa prática ainda tem sido pouco adotada

(difícil adoção e pode ferir as raízes promovendo aumento de doenças), sendo mais comum a aplicação da ureia a lanço e sem incorporação ao solo, o que intensifica as perdas de N.

O efeito da presença de resíduos culturais sobre a volatilização de amônia na maioria das vezes é variável. Pois, quando esse sistema confere maior umidade ao solo, em comparação ao solo descoberto, as perdas são reduzidas. Porém, logo após chuva, situação em que o solo com ou sem resíduos apresentam teores de umidade semelhantes, o solo com resíduos favorece a maior volatilização de amônia, devido a maior atividade da enzima urease (Da Ros et al., 2005).

Com intuito de aumentar a eficiência no uso de N da ureia, minimizando as perdas de N pela volatilização de amônia para a atmosfera e/ou pela lixiviação do ânion nitrato (NO_3^-) para as camadas profundas do solo e até mesmo para os corpos hídricos, tem se usado inibidores de urease e inibidores da nitrificação junto à ureia (Soares et al., 2012).

Assim, os sistemas de cultivo agrícola têm buscado práticas de manejo que minimizem as perdas de N no sistema e que otimizem o uso de N pelas culturas. Através do uso do N fertilizante marcado com ^{15}N , Franco et al. (2011) verificaram que o aproveitamento desse pela cana-planta e soca é diferenciado. O N advindo do fertilizante contribui com até 40% do total de N na cana planta nas fases iniciais do desenvolvimento, mas durante os estágios de maturidade a magnitude dessa contribuição é menor, sendo de aproximadamente 10% do total de N. Na primeira soca, o aproveitamento do N fertilizante é mais eficaz para a nutrição da cultura, constituindo até 70% do N total nas fases iniciais de desenvolvimento e diminuindo ao longo do desenvolvimento da cana-de-açúcar, atingindo cerca de 30% na colheita (Franco et al., 2011). Dessa forma, os estudos que avaliam o aproveitamento de N fertilizante pela cultura apenas na colheita tendem a subestimar o papel do N advindo do fertilizante na nutrição da cana-de-açúcar. O maior aproveitamento de N fertilizante, em cana-soca, mostra que neste ciclo da cultura há uma resposta mais consistente à adubação nitrogenada em comparação à cana-planta, conforme observado em vários estudos desenvolvidos no país nas últimas décadas (Franco et al., 2011).

Embora a mineralização da própria palhada da cana-de-açúcar, que fica depositada sobre a superfície do solo seja uma possível fonte de N para a cultura, através da mineralização desse material, boa parte desse N é imobilizado no solo. Assim, essa fonte geralmente apresenta uma lenta disponibilidade de N à cultura (Basanta et al., 2003).

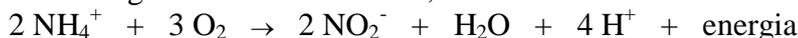
Outra importante forma de incorporar N ao sistema de cultivo da cana-de-açúcar é o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), onde algumas variedades podem obter mais do que 60% do N através da FBN (Urquiaga et al., 1992) mas, a contribuição de N advindo desse processo é muito variável. Baptista et al. (2014), observaram quantidades de N advindo da FBN que variaram entre 80 e 170 kg ha^{-1} , durante o cultivo de cana planta (18 meses).

Outro processo que também contribui para o aumento das perdas de N no sistema de cultivo da cana-de-açúcar é a desnitrificação, onde formas oxidadas de N são reduzidas bioquimicamente a formas gasosas (N_2 e N_2O). Além da perda propriamente dita de N no sistema, o óxido nitroso (N_2O), embora seja emitido em menores quantidades que o CH_4 e CO_2 , apresenta um potencial de aquecimento de 296 vezes maior que o CO_2 (Carvalho et al., 2010).

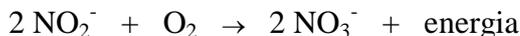
A formação de N_2O no solo se dá, principalmente, pelos processos de nitrificação e desnitrificação, que utilizam como substrato NH_4^+ e NO_3^- , respectivamente (Signor et al., 2013). A nitrificação ocorre pela oxidação do NH_4^+ a NO_3^- , sendo realizada por diferentes grupos de bactérias quimioautotróficas (Moreira e Siqueira, 2006). Estas são bactérias gram negativas da família *Nitrobacteriaceae*, que são capazes de crescer à custa da energia contida

no NH_4^+ ou NO_2^- , sendo também referidas como bactérias oxidantes do N. A nitrificação ocorre em duas etapas:

a) Nitritação: que é a transformação de NH_4^+ a nitrito (NO_2^-), mediada, por exemplo, por bactérias do gênero *Nitrosomonas* e;



b) Nitratação: que é a transformação de NO_2^- a NO_3^- , em que participam bactérias do gênero *Nitrobacter*.



Outra transformação do N que pode ocorrer nos solos é a desnitrificação, que consiste na redução bioquímica de formas oxidadas de N as formas gasosas (N_2O e N_2), na seguinte sequência:



Esse processo também corresponde a uma perda de N no solo, sendo o mesmo realizado por várias bactérias anaeróbias facultativas, as quais utilizam as formas oxidadas de N como receptores terminais de elétrons, oriundos da oxidação de substratos reduzidos (Moreira e Siqueira, 2006).

Os principais fatores que interferem no processo de nitrificação e desnitrificação são: umidade, temperatura, presença de oxigênio, teores disponíveis de carbono orgânico e nitrogênio, relação C/N da matéria orgânica do solo (Signor et al., 2013). Dentre estes fatores, aqueles relacionados ao solo podem facilmente ser alterados por práticas de manejo. Portanto, conhecer os processos de formação do N_2O nos solos e compreender os fatores que alteram as emissões é fundamental para que sejam desenvolvidas medidas eficientes de redução das emissões de N_2O em solos agrícolas.

A partir de amostras de solos da Europa sob diferentes usos e clima, Shaufler et al. (2010) avaliaram a influência da temperatura e umidade do solo sobre os fluxos de óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) em condições controladas de laboratório, onde verificaram um aumento não linear da emissão de N_2O , NO e de CO_2 com o aumento da temperatura e também que a emissão de N_2O se correlacionou positivamente com a umidade do solo, enquanto a emissão de NO e as taxas de oxidação de CH_4 correlacionaram-se negativamente com a umidade do solo.

Além disso, os autores observaram que o tipo de uso da terra também afeta fortemente os fluxos GEE, onde as emissões de N_2O e CO_2 foram maiores em solos de pastagem, enquanto que as emissões de NO foram maiores nos solos florestais. Em pastagens, a alta atividade microbiana do solo estimulada por elevados teores de N e de C, pela alta incorporação de carbono da biomassa e da alta densidade de raízes no solo, foram as possíveis causas para as altas emissões de N_2O e CO_2 . Elevadas emissões em solos florestais foram atribuídas principalmente ao baixo pH e alta porosidade do solo (Shaufler et al., 2010).

No caso da cana-de-açúcar, o manejo da palhada com manutenção ou remoção da mesma sobre a superfície do solo, no sistema de colheita sem queima, associados a diferentes níveis de umidade do solo, bem como a disponibilidade de N no solo, também pode influenciar na emissão de N_2O . Vargas et al. (2013) avaliaram a quantidade de N_2O emitida em experimento de casa de vegetação em Piracicaba-SP, utilizando colunas de PVC contendo solo retirado dos primeiros 20 cm de profundidade de um Argissolo Eutrófico e como tratamento sem e com adição de palha (0 e 16 Mg ha⁻¹), quatro níveis de umidade no solo (25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de retenção do solo) e dois níveis de adubação (controle – sem aplicação de N e com uma dose equivalente a 21 kg N ha⁻¹ a base de sulfato de amônio). Os autores observaram um aumento linear dos fluxos de N_2O com o aumento da umidade do solo, entretanto, o efeito foi duas vezes superior quando a palha estava presente,

indicando que a mineralização da palha pode adicionar facilmente C disponível e até mesmo N para promover a atividade microbiana responsável pela produção de N₂O. Mas, segundo esses autores, a aplicação de N não apresentou efeito significativo sobre a emissão de N₂O, possivelmente, devido à dose aplicada ser bem menor que a recomendada à cultura da cana-de-açúcar. Provavelmente, a maior parte do N fornecido foi rapidamente imobilizado por microrganismos do solo para decompor a palha, um resíduo com uma relação C:N superior a 100, assim pouco de N permaneceu disponível para perdas de N- N₂O. Outra possível razão é o tempo de pré-incubação (63 dias) nas colunas de solo que, provavelmente, mineralizou o N em quantidades elevadas o suficiente para mascarar a adubação nitrogenada.

Em estudo com diferentes níveis de palha, ao investigar como o tempo atua sobre a decomposição da palhada, e a sua influência sobre as emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) com diferentes quantidades de deposição de palhada (0, 50 e 100 %) sobre o solo no agroecossistema cana-de-açúcar, Signor et al. (2014) avaliaram as emissões de GEE em diferentes experimentos que representaram 3 épocas de avaliação (após a colheita, 6 meses após a colheita e 12 meses após a colheita, onde 100, 50 e 0 % de palhada correspondem a 17,95; 8,17 e 7,90 Mg ha⁻¹, respectivamente). Os autores verificaram que após a colheita as emissões de CO₂ e CH₄ aumentaram linearmente com o aumento da dose de palha mantida sobre o solo, mas a de N₂O foi semelhante em todas as doses de palha, enquanto após 6 meses de colheita o fluxo médio de N₂O diminuiu com o aumento da quantidade de palha sobre a superfície. Nas avaliações de GEE de 12 meses após a colheita não houve efeito das diferentes quantidades de palha. Segundo Zotelli (2012) isso ocorre devido ao fato de nesse período as emissões se estabilizarem ocorrendo apenas a emissão natural do solo.

Em outro estudo Vasconcelos et al. (2018), também observaram menor emissão de N₂O em área com remoção total da palha da cana-de-açúcar em relação a diferentes quantidades de palha mantida sobre a superfície do solo. Além da manutenção da palhada, outro fator que contribui para aumentos drásticos das emissões de N₂O do solo é a aplicação da vinhaça nos canaviais (Lopes et al., 2017; Carmo et al., 2013; Oliveira et al., 2013). Carmo e colaboradores (2013), verificaram que em sistema com manutenção de 21 Mg ha⁻¹ de palha com a aplicação de vinhaça (200 m³ ha⁻¹), a emissão de N₂O é de aproximadamente 7.400 g ha⁻¹ ano⁻¹, ao passo que não aplicação da vinhaça diminui o valor emitido em até 46%.

A partir dos estudos citados acima, observa-se que geralmente a retirada da palhada da superfície do solo, para geração de energia e/ou produção de álcool de segunda geração diminui a emissão de N₂O e o aporte de C no solo (Satiro et al., 2017; Thorburn et al., 2012). Estes resultados de estudos que contemplem o balanço entre a entrada de carbono no sistema (estabilização de C no solo) e a emissão de N₂O, CO₂ e CH₄, em CO₂ equivalente, com diferentes níveis de remoção da palhada da cana-de-açúcar, nas diferentes condições edafoclimáticas de produção no Brasil e ao longo do tempo. O maior detalhamento dos estudos de balanço de C no sistema (entrada x saída) impede que generalizações de manejo da quantidade de palha da cana-de-açúcar ocorram de formas equivocadas.

2.4 Manejo da Palhada da Cana-de-Açúcar

Segundo dados da Conab (2017) as áreas de produção de cana-de-açúcar no Brasil colhida de forma manual (com queima) representam atualmente menos de 10%. Essa quantidade é ainda menor quando se considera a região centro-sul do país (região responsável por maioria da produção nacional). Assim, atualmente mais de 90% das lavouras canavieiras têm sido colhidas de forma mecânica e sem queima.

Além da redução do uso do fogo nos canaviais, previamente à colheita, outra prática emergente no setor sucroalcooleiro é o recolhimento da palhada que fica sobre o solo para a

cogeração de energia e/ou produção de etanol de segunda geração. A prática de recolhimento da palhada demanda energia, principalmente, para a realização dos processos mecanizáveis, tais como enleiramento, coleta, e transporte da palhada. Todavia, o balanço energético final dessa prática ainda é viável (Tieppo et al., 2014). Contudo, os efeitos dessa atividade sobre as características químicas, biológicas e, principalmente, físicas do solo ainda são escassos com diferentes níveis de remoção de palha. A maioria dos trabalhos referentes ao efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar contrastaram o sistema de colheita com e sem queima.

De modo geral, os trabalhos com sistemas de colheita com e sem queima, relatam que a manutenção da palhada na superfície do solo proporciona resultados positivos como: diminuição da emissão de GEE (Bordonal et al., 2012; Figueiredo e Scala Jr, 2011), aumento da produtividade de colmos (Schultz et al., 2010), aumento no teor de carbono orgânico do solo (Cerri et al., 2011; Pinheiro et al., 2010; Galdos et al., 2009; Mendoza et al., 2000) e de substâncias húmicas (Canellas et al., 2003; Mendoza et al., 2000) e físicas (Thorburn et al., 2012), melhoria da fertilidade do solo (Souza et al., 2012), maior retenção de umidade do solo (Peres et al., 2010; Urquiaga et al., 1991), proteção do solo contra os processos erosivos (Souza et al., 2012), favorecimento de melhores condições a fauna do solo (Benazzi et al., 2013), dentre outros benefícios.

Em uma revisão mais ampla sobre o recolhimento de parte da palha da cana-de-açúcar do solo e seus efeitos sobre as variáveis agrônômicas e ambientais, Carvalho et al. (2016), afirmam a manutenção da palha sobre o solo fornece inúmeros serviços ecossistêmicos, incluindo reciclagem de nutrientes, biodiversidade do solo, armazenamento de água, acúmulo de carbono, controle da erosão do solo e infestação de ervas daninhas. Para tal, os estudos utilizados por Carvalho e colaboradores apontam a manutenção de pelo menos $7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de palha. Por outro lado, observaram que a remoção total da palha é favorável no controle de pragas e para menores emissões de N_2O , quando a palha é associada a adubação nitrogenada e com vinhaça. Sob condições específicas de solo e clima frio, Carvalho et al. (2016), encontraram trabalhos que comprovam alguns efeitos negativos causados pela manutenção da palha no sistema de produção da cana-de-açúcar.

Nessas regiões que a manutenção da palha é prejudicial à produção de biomassa da cultura da cana-de-açúcar, uma das alternativas propostas além do recolhimento da palha é o “desaleiramento” nas linhas de cultivo, o qual consiste na remoção da palhada apenas das linhas de plantio da cana-de-açúcar, mantendo todas as entrelinhas sob cobertura de palhada (Leme Filho, 2009).

Contudo, mais estudos com diferentes níveis de remoção da palha da cana-de-açúcar são necessários para definir qual a porcentagem de palhada pode ser retirada para a cogeração de energia e/ou produção de álcool de segunda geração, com o mínimo de comprometimento negativo sobre a qualidade do solo, a longevidade e produtividade dos canaviais em diferentes condições edafoclimáticas de produção no Brasil.

2.4.1 Remoção da palhada e dinâmica da MOS

A variação dos valores do estoque de carbono (ΔEstC) em áreas de cultivo em relação a ambientes naturais permite avaliar se o solo está armazenando ou emitindo C-CO_2 para a atmosfera (Neves et al., 2004). De acordo com o trabalho de Barros et al. (2013), realizado no município de Capim-PB, em Argissolo Acinzentado distrófico típico, o cultivo da cana-de-açúcar, com e sem aplicação de vinhaça, diminuem os teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo em comparação a condição de mata nativa, constatando que a mata nativa desempenha papel de sequestrador (armazenador) de carbono. Além disso, observa-se a partir dos resultados desse trabalho que a relação carbono/nitrogênio no solo dos diferentes sistemas se mantém.

A estabilização do carbono (C) no solo é um fator crítico que influencia no ciclo global do C. A variação do compartimento de C estável (húmus) da matéria orgânica do solo (MOS) deve ser aumentada para melhorar a estabilização de C no solo e o aumentar o seu tempo médio de permanência (Paul et al., 1997). Embora o C do solo esteja distribuído em diferentes compartimentos, com diferentes estabilidades e ciclagens, esses índices são importantes para detectar a influência do manejo agrícola na qualidade do solo (Silveira et al., 2008), na proteção física da MOS, aumentando o tempo médio de permanência do carbono no solo (Dungait et al., 2012).

O carbono orgânico do solo pode ser estabilizado através de diferentes mecanismos, incluindo a preservação seletiva de moléculas bioquimicamente recalcitrantes (recalcitrância), inacessibilidade espacial para decompositores e enzimas (proteção física) (Dungait et al., 2012) e interações com as superfícies minerais e íons metálicos do solo (proteção química) (von Lützow et al., 2008).

Segundo Pinheiro et al. (2004), o fracionamento densimétrico da matéria orgânica possibilita avaliar como o manejo dos sistemas agrícolas interfere nos compartimentos da MOS. O compartimento oriundo do fracionamento densimétrico da MOS é a fração leve (FL) e divide-se em: leve livre (FLL) - correspondente à matéria orgânica não complexada, constituída por materiais orgânicos derivados principalmente de restos de vegetais, mas que contêm quantidades de resíduos microbianos e da microfauna e apresenta rápida taxa de transformação; e leve intra-agregado (FLI) - constituída de parte da FL incorporada e fisicamente estabilizada em macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$), compreendendo um variado conjunto de compostos orgânicos, com tamanho reduzido e grau de decomposição mais avançado em comparação a FLL.

Contudo, estudos avaliando a dinâmica do COS, em sistemas de produção de cana-de-açúcar colhida mecanicamente e sem queima, depositando sobre o solo diferentes quantidades de palhada, no Brasil ainda são incipientes, principalmente em diferentes condições edafoclimáticas.

Independente da cultura, a manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo é uma prática recomendada para melhorar a produtividade do mesmo e simultaneamente mitigar a influência negativa das emissões de gases do efeito estufa (GEE), através do sequestro de C no solo (Jiang et al., 2017). Estudos com diferentes deposições de palha sobre o solo, sob diferentes culturas e condições de cultivo mostram que de maneira geral a deposição de $7,5$ à $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de palha, resultam em maior qualidade do solo e conseqüentemente em maior rendimento das culturas (Jiang et al., 2017; Zhao et al., 2016; Aquino et al., 2015; Zhu et al., 2015).

A correlação entre a qualidade do solo e a produtividade das culturas geralmente é positiva. Assim, acredita que sistemas de manejo que visam a manutenção e ou aumento dos teores de carbono do solo, apresentam de maneira geral, melhoria nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, haja vista que a matéria orgânica dos solos é considerada como indicador chave de qualidade do solo (D' Hose et al., 2014).

Em estudo desenvolvido por Aquino et al. (2017), avaliando a influência de diferentes quantidades de palhada da cana-de-açúcar (variedade SP80 1816) sobre o solo (0%, 25% (5 Mg ha^{-1}), 50% (10 Mg ha^{-1}), 75% (15 Mg ha^{-1}), 100% (20 Mg ha^{-1})), e cana-queimada, em Bandeirantes-PR, sob Latossolo Vermelho Eutroférico, utilizando a variedade SP80 1816, verificaram que de maneira geral, a manutenção de 50% de palhada promove os mesmos benefícios que os tratamentos 75 e 100% sobre o desenvolvimento e produtividade das soqueiras, em condições de escassez de chuva, sendo recomendado a manutenção à campo de $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Em experimentos sob rotação de arroz/trigo na China, Zhu et al. (2015), observaram que o retorno anual de 50% de palha ao solo ($7,5 \text{ Mg ha}^{-1} - 4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha de arroz e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha de trigo), melhorou o conteúdo de C do solo bem como, a produtividade das culturas, em dois ciclos de cultivo consecutivos. Contudo, em experimento de longo prazo, também na China, Zhao et al. (2016), verificaram que não só o retorno de 50% ($4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) mas principalmente o de 100% (9 Mg ha^{-1}) de palha de milho, resultaram em aumentos significativos de fração leve livre (FLL) da matéria orgânica do solo e do conteúdo de C dessa fração (CFLL) em comparação ao tratamento CK (sem retorno de palha (0%) e sem adubação nitrogenada e fosfatada). O aumento de FLL e CFLL no tratamento com retorno de 100% palha em comparação ao com 0% de palha foi de 48,0 e 81,3 %, respectivamente.

O ganho de rendimento na cultura do milho observado por Jiang et al. (2017), no nordeste da China, em experimento com 5 anos de deposição de diferentes quantidades de palha ao solo, foi de 11 e 21%, com a aplicação de 50% (4 Mg ha^{-1}) e 100% (8 Mg ha^{-1}), respectivamente, em relação ao tratamento sem incorporação de palha. Assim, a quantidade de palha depositada sobre o solo é um dos fatores que influenciam na dinâmica da matéria orgânica do solo e conseqüentemente na produtividade das culturas (Jiang et al., 2017; Thorburn et al., 2012; Zhao et al., 2016; Zhu et al., 2015).

Para haver o estoque de C no solo, as taxas de deposição de palha devem ser maiores que a perdas de C, o que pode estar associado a inibição da atividade da enzima oxidativa, responsável pela degradação da MOS (Zhao et al., 2016), a qual foi inibida devido a maior fertilidade do solo, proporcionada pela adubação nitrogenada e da manutenção da palha no solo. Jiang et al. (2017), encontraram uma taxa de sequestro de C com resposta linear a deposição de palha (taxa de sequestro de C = $0,29 \times$ entrada anual de C - $0,57$), ou seja, para garantir a manutenção do conteúdo de C no solo deve-se adicionar no mínimo $1,89 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Jiang et al., 2017). Dessa forma, o recolhimento de toda palha, diminuiria os níveis de C do solo utilizado no estudo desses autores.

Ao considerar a palha de cana-de-açúcar, que apresenta 47 % de C (Yamaguchi et al., 2017), e que no sistema com colheita sem queima da palha são adicionados de 10 a $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca sobre o solo (Schultz et al., 2010), têm-se um aporte de C anual que varia de $4,7$ a $9,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, ou seja, um valor médio de $7,05 \text{ Mg ha}^{-1}$, dos quais apenas $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Ceri et al., 2011) é aportado nos solos. A estabilização do carbono no solo depende principalmente da quantidade de resíduos aportados ao sistema, do potencial de armazenamento de carbono do solo, das condições climáticas e do tempo de instalação dos cultivos (Jiang et al., 2017; Satiro et al., 2017; Corbeels et al., 2016; Zhao et al., 2016; Zhu et al., 2015; Thorburn et al., 2012).

A matéria orgânica total do solo é menos sensível as mudanças de práticas de manejo, principalmente a curto prazo. Contudo, o aporte de fração leve livre (FLL) e de fração leve intra-agregada (FLI), consideradas frações lábeis da MOS, são denominadas de indicadores precoces das mudanças na qualidade do solo (Malhi et al., 2011).

Em experimento de curto prazo (2 anos), localizados nos municípios de Capivari e Valparaíso (Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho, respectivamente), sob condições semelhantes de clima, com diferentes níveis de remoção da palha da cana-de-açúcar, Satiro et al. (2017), observaram que as alterações nos estoques de carbono do solo se restringem as camadas mais superficiais e ao Latossolo, onde a manutenção de no mínimo 50% ($8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) favoreceu o aumento do estoque de C do quando comparado ao tratamento com remoção total da palha.

Abreu (2013), em experimento com diferentes níveis de remoção da palha da cana-de-açúcar do solo, observou que a deposição de palha a partir de $2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, contribui para o aumento dos estoques de carbono orgânico, nitrogênio total do solo e dos teores de carbono

solúvel em água, no período seco. Além disso, que a manutenção da palha sobre a superfície do solo (sem incorporação) aumenta a atividade da biomassa microbiana nas camadas superficiais, durante o período seco.

2.4.2 Remoção da palhada e propriedades químicas do solo

O enriquecimento do solo com nutrientes a partir de resíduos de cana (palhada) é variável. O K é o nutriente mais rapidamente disponível, uma vez que se encontra nos tecidos das plantas na forma iônica ou em forma de complexos fracos, os quais são facilmente lixiviados quando em altas proporções na palhada (de Oliveira et al., 2002). Os elementos Ca, Mg, S e P são mais lentamente libertados dos resíduos, de 40-80% após um ano de decomposição (de Oliveira et al., 2002). Na maioria das plantas o N, P e S são assimilados formando proteínas vegetais, ácidos nucleicos e outros compostos ou os seus precursores (Marschner, 1995), de modo que a mineralização destes nutrientes a partir de resíduos de cana ocorre quando os produtos microbianos, formados durante a decomposição inicial, são subsequentemente decompostos.

Em sistema de colheita da cana-de-açúcar com remoção da palha através da queima da palhada, ao avaliar as características químicas do solo antes e imediatamente após a prática de queima, Marques et al. (2009), verificaram em estudo realizado no município de Itaúna do Sul-PR, que a queima, de maneira geral, não altera significativamente os atributos químicos do solo. Ou seja, o ato da queima do canavial não influencia instantaneamente a dinâmica dos nutrientes no solo.

Mas, a maioria dos trabalhos que avaliaram a fertilidade do solo, em áreas que colhem a cana-de-açúcar sem a queima, têm evidenciado que a manutenção da palhada sobre a superfície do solo ao longo do tempo, principalmente nas camadas mais superficiais do solo, pode contribuir na melhoria dos atributos químicos do solo quando comparado ao sistema que queima a palhada (Souza et al., 2012; Thorburn et al., 2012; Correia e Alleoni, 2011; Canellas et al., 2003; Graham et al., 2002; Mendoza et al., 2000) ou que remove totalmente a palha do solo (Satiro et al., 2017).

Em experimento, com 5 anos de duração, sob diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar (com e sem queima), porém ambos sob colheita manual, em solo de tabuleiro (Argissolo Amarelo), no município de Linhares-ES, Mendoza et al. (2000) averiguaram que a colheita da cana sem queima da palha resulta em maiores teores Mg^{+2} e C, enquanto a colheita de cana com queima da palha elevou os teores de P e K^{+} no solo. Também constataram que a manutenção da palhada na superfície aumentou os teores da fração húmica e da fração ácidos fúlvicos na matéria orgânica do solo.

Em área com 14 anos de implantação sob sistemas de colheita da cana-de-açúcar com (CQ) e sem queima (SQ), sobre Latossolo Vermelho Distrófico, localizada em Pradópolis-SP, Correia e Alleoni (2011), observaram que os teores de carbono e a fertilidade do solo foram mais elevados na cana SQ em comparação a CQ, principalmente nas camadas mais superficiais, exceção para os teores de P disponível.

Em estudo desenvolvido por Souza et al. (2012), identificaram em experimento conduzido em Latossolo Vermelho Distrófico, textura média, em Paraguaçu Paulista-SP, foi verificado que a manutenção da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo melhorou os atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm de profundidade. Esses autores observaram, em sistema sem queima por seis anos, maiores teores de C, pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , P e K^{+} , e menores teores de Al^{+3} e H+Al, quando comparado a área com queima da palhada, ao longo de 16 anos.

Ao avaliar um experimento com tratamentos com e sem queima da palhada ao longo de 55 anos, em Cambissolo Háptico, localizado no município de Campos dos Goytacazes-RJ,

Canellas et al. (2003), observaram até a profundidade de 40 cm, diminuição dos valores de pH, C, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, N, T, V%, Fe, Cu, Zn e Mn, no solo sob colheita com queima da palhada, corroborando em grande parte com os resultados encontrados por Correia e Alleoni (2011) e Souza et al. (2012).

Contudo, os resultados em relação a disponibilidade de fósforo no solo sob diferentes formas de manejo da palhada da cana-de-açúcar (com ou sem queima) ainda são controversos. Pois, embora Canellas et al. (2003) e Souza et al. (2012) tenham encontrado maiores teores de P (fósforo disponível) em áreas sem queima da palhada, Mendonza et al. (2000), Correia & Alleoni (2011) e Thorburn et al. (2012), verificaram maiores valores de P em áreas que queimam a palhada. A maior disponibilidade de P em sistemas que queimam a palhada pode ser explicada devido as cinzas da palhada apresentarem fosfatos de cálcio (Ball-Coelho et al., 1993).

Ao considerar uma maior variedade de locais (Woodford Island; Mackay; Tully; Ayr; Abergowrie), de experimentos conduzidos na Austrália, com diferentes períodos (em anos) de retenção da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo (1; 5; 6; 9; 17 anos), respectivamente para cada local, Thorburn et al. (2012), verificaram, ao contrário de outros estudos, que não há uma relação consistente das respostas do manejo da palhada da cana-de-açúcar ao conteúdo de carbono e nutrientes no solo, em resposta à duração do tempo de manejo da palhada (com ou sem queima).

Mas, de maneira geral, esses autores observaram que as mudanças na concentração de C e N em diferentes camadas do solo só se tornam aparentes após cerca de 5 anos de manutenção da palhada. Porém, a amplitude das mudanças é altamente dependente de cada local, devido a múltiplos fatores que influenciam o C do solo (por exemplo, solo, clima, culturas, práticas de gestão, a fauna do solo) em cada local. Assim, não observaram uma tendência consistente dos teores de nutrientes em relação ao período de retenção da palhada da cana-de-açúcar. Entretanto, observaram maiores valores de P e Ca⁺² quando a palhada foi queimada, em todos os locais, exceção para o Ca⁺² em Abergowrie.

Estudos avaliando o efeito da remoção de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar da superfície do solo sobre os atributos químicos ainda são escassos. Mas, a palha apresenta grande potencial de contribuição na melhoria da fertilidade do solo e até mesmo de redução na recomendação de adubos. Os valores de nutrientes presentes na palha (kg ha⁻¹) são: nitrogênio (39-72), potássio (35-173), magnésio (6-26); cálcio (9-81); enxofre (7-15); fósforo (4-23) (Hewong et al., 2009; Meier et al., 2006; Oliveira et al., 2002). Contudo, a maior taxa de liberação via mineralização da palha ocorre principalmente para o potássio, cálcio e nitrogênio (Fortes et al., 2012).

Em estudo recente com 2 anos de experimentação, Satiro et al. (2017), relatam que a maior remoção de palha do sistema diminui principalmente a disponibilidade de potássio no solo, visto que esse se faz presente em maiores quantidades na palha e apresenta uma liberação mais rápida (Fortes et al., 2012). Contudo, Satiro e colaboradores, observaram na camada mais superficial (0-2,5 cm) de Argissolo Vermelho de textura franco arenosa, que a manutenção de 100% de palha (13,2 Mg ha⁻¹) aumenta os teores de cálcio e magnésio em 40 e 60%, respectivamente, em comparação ao tratamento com remoção total da palha (0% de palha). Entretanto, esses autores não encontraram esse mesmo efeito em Latossolo Vermelho de textura argilo-arenosa, o que indica que os efeitos dos níveis de palha sobre os atributos químicos do solo também são dependentes das características edáficas de cada local.

2.4.3 Remoção da palhada e qualidade física do solo

Ao avaliar diferentes sistemas de colheita da palhada da cana-de-açúcar (sem queima e queimada, mas ambas com corte manual), em experimento com 5 anos de duração, em

Linhares-ES, sob Argissolo Amarelo, Ceddia et al. (1999) averiguaram que a manutenção da palhada sobre o solo altera os atributos físicos do solo. Esses autores observaram, na área de cana queimada e na profundidade de 0-5 cm, valores de densidade do solo significativamente superiores ao da área de cana sem queima perante a colheita. Ainda, na cana queimada, o valor do diâmetro médio ponderado dos agregados foi significativamente menor que a cana sem queima, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, indicando compactação superficial e consequente diminuição da velocidade de infiltração instantânea da água no solo.

Mas, o estudo de Ceddia et al. (1999) é uma exceção, pois a maioria dos trabalhos que avaliam os atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo da palhada, com e sem queima, indiretamente também avaliam o efeito da colheita manual e mecânica, respectivamente (Torres et al., 2013; Sousa et al., 2012; Andrade et al., 2011; Garbiate et al., 2011; Machado et al., 2010; Vasconcelos et al., 2010; Luca et al., 2008; Souza et al., 2006; Souza et al., 2005; Wood, 1991). E a maior parte das lavouras de cana-de-açúcar são colhidas mecanicamente (sem queima). A manutenção da palha nesse sistema reflete positivamente no aporte de C no solo o que repercute na melhoria dos atributos físicos do solo. Contudo, estudos têm comprovado que a colheita mecânica causa compactação do solo, com efeitos negativos geralmente mais pronunciada na camada de 20-30 cm.

O intenso tráfego de colhedoras e implementos agrícolas, no sistema de colheita mecânica, geralmente aumenta a densidade do solo e a resistência do solo a penetração, diminui a porosidade total, a infiltração da água no solo e o diâmetro médio ponderado dos agregados (Torres et al., 2013; Roque et al., 2010; Souza et al., 2005; Wood, 1991). Como consequência, do aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração ocorre prejuízos na dinâmica da água, de nutrientes e o crescimento das raízes (Letey, 1985).

A cobertura do solo com resíduos vegetais, oriundos da colheita mecânica de cana crua, reduz os efeitos negativos do tráfego de máquinas causados sobre os atributos físicos do solo (Garbiate et al., 2011). Esses autores observaram, em área com colheita mecânica (com e sem queima) e colheita manual (com queima), no município de Naviraí-MS, sob Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, que embora a colheita mecânica resulte em aumento da densidade do solo, diminuição da estabilidade de agregados, quando a mesma é realizada em área sem queima o efeito da compactação é amenizado quando comparado a área com queima da palhada.

Outro efeito positivo da manutenção da palhada sobre a superfície do solo é a diminuição da erosão do solo. A erosão em entressulcos de cana-de-açúcar resulta da desagregação causada pelo impacto das gotas de chuva na superfície do solo e pelo transporte superficial das partículas do solo desagregadas, onde se encontram a matéria orgânica e os nutrientes fundamentais para a produção agrícola (Sousa et al., 2012). Em áreas com maior declividade a ausência de cobertura vegetal as perdas de nutrientes e matéria orgânica do solo são ainda maiores.

Ao avaliar diferentes quantidades de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) em três posições de uma vertente (topo com declividade $0,025 \text{ m m}^{-1}$, meia-encosta com declividade $0,05 \text{ m m}^{-1}$ e sopé com $0,07 \text{ m m}^{-1}$), em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, localizado em Guariba – SP, Sousa et al. (2012), verificaram após a aplicação de uma chuva simulada com intensidade de 60 mm h^{-1} , durante 65 minutos, que a manutenção acima de 50% de palhada reduz as perdas de solo e de matéria orgânica, bem como diminui a concentração de nutrientes no sedimento erodido. E que independentemente da posição na vertente, as perdas de solo foram reduzidas quando aumentou a quantidade de palha de cana-de-açúcar utilizada na cobertura do solo.

Em experimento realizado no norte da Austrália, com tratamentos sem queima da palhada da cana-de-açúcar, com e sem a incorporação no solo, e com queima, Wood (1991),

verificou na profundidade de 7 cm que a densidade do solo aumentou e, a porosidade total do solo diminuiu com o passar dos anos de cultivo (do primeiro ao sexto corte), e que os melhores valores foram observados na área com queima (colheita manual) em comparação a área não queimada (colheita mecânica). E através da análise de infiltração da água no solo, o autor também identificou que os efeitos negativos da colheita sem queima (colheita mecânica) são ainda maiores na região da entrelinha de cultivo quando comparado a linha, isso ocorre em razão de ser o local mais atingido pelo tráfego das colhedoras.

Os resultados observados por Roque et al. (2010), em estudo realizado em Padrópolis-SP, sob Latossolo Vermelho Distrófico típico álico, em área de cultivo de cana-de-açúcar com diferentes formas de colheita mecanizada, onde avaliaram os atributos físicos do solo nas linhas de plantio, nas entre linhas (local onde a roda do trator trafega) e no enterrodado (entre a linha de plantio e a entre linha), também confirmam que a compactação do solo ocorre mais significativamente na região da entre linha. Esses autores, verificaram que o tráfego das máquinas agrícolas aumenta a densidade do solo, diminui o diâmetro médio ponderado dos agregados e a macroporosidade na linha de rodado em relação à linha de plantio, o que causa a degradação cumulativa da qualidade física do solo ao longo dos anos de cultivo.

A manutenção da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo também contribui na manutenção da umidade do solo, o que aumenta a produtividade da cana-de-açúcar em regiões que apresentam restrições hídricas ao longo do ano (Aquino et al., 2018, 2017; Anjos et al., 2017, Peres et al., 2010).

Em estudo comparando áreas de cana-de-açúcar com e sem palha, em Araras-SP sob Latossolo Vermelho-Escuro (textura argilosa), Peres et al. (2010), verificaram que a deposição de palhada sobre a superfície do solo diminui as perdas de água por evaporação. Ao monitorar ao longo de 27 dias a umidade volumétrica do solo nos tratamentos de cana-de-açúcar com palha (CP) e sem palha (SP), nas camadas 0-20 e 20-40 cm, os autores observaram as maiores perdas de umidade na camada superficial e que o tratamento CP possibilitou redução da perda de água do solo de até 53,3% em comparação ao tratamento que não usou a palha como cobertura (SP).

Nesse contexto de colheita mecanizada não se recomenda a remoção total de palha da cana-de-açúcar do solo, pois isso potencializa ainda mais a degradação dos atributos físicos do solo. O que resulta em aumento da densidade e resistência do solo a penetração das raízes limitando o desenvolvimento das plantas (Satiro et al., 2017). Os efeitos positivos da manutenção da palha estão relacionados a redução dos processos erosivos (Sousa et al., 2012; Andrade et al., 2011; Garbiate et al., 2011), a melhor estruturação do solo devido a maior agregação do mesmo (Ceddia et al., 1999), a redução das pressões de contato aplicadas sobre o solo, diminuindo o risco de compactação (Vischi Filho et al., 2015), e a menor perda de água por evaporação do solo (Anjos et al., 2017; Peres et al., 2010).

Além da manutenção da palha da cana-de-açúcar sobre o solo, outra prática que contribui para redução das perdas de qualidade física do solo é o controle do tráfego das máquinas agrícolas e ajustes no espaçamento de plantio da cultura (Rossi Neto et al., 2018). Um dos espaçamentos sugeridos e que já estão sendo utilizados por parte das áreas de cultivo da cana-de-açúcar é o espaçamento alternado (0,90 x 1,5 m entre linhas duplas) o qual geralmente proporciona maiores produtividades que o espaçamento simples (1,5 m) (Rossi Neto et al., 2018; Ismael et al., 2007).

O uso do espaçamento duplo alternado (0,9 x 1,5 m) reduz o número de rodados em relação ao plantio convencional com linhas simples (1,5 m de espaçamento) e conseqüentemente a área afetada pela compactação do solo. Os atributos físicos do solo são negativamente afetados nas linhas trafegadas, sendo necessário avaliar o efeito dos níveis de palha sobre o solo nas linhas trafegadas e não trafegadas.

2.4.4 Remoção da palhada e atributos biológicos do solo

A biota do solo é composta por microrganismos e organismos maiores, conhecidos como fauna do solo. A fauna do solo pode ser classificada de diversas formas, sendo uma delas de acordo com o seu tamanho corporal, em: Microfauna, mesofauna e macrofauna. O processo de decomposição dos resíduos vegetais é realizado em grande parte por esses organismos que atuam de diferentes formas (Lavelle et al., 2006).

A microfauna é composta por organismos com diâmetro corporal variando entre 4 e 100µm. É composta por protozoários, nematoides, entre outros. Atuam indiretamente na ciclagem de nutrientes, regulando a população de bactérias e fungos. A mesofauna (organismos diâmetro corporal entre 100 µm e 2 mm), pode atuar diretamente ou indiretamente no processo de decomposição da MOS. É composta por animais como colêmbolos, ácaros, díptera, enchytraeidae, isoptera, chilopoda, diplópodes, entre outros. Esses animais são extremamente dependentes da umidade do solo, pois se movimentam nos poros formados por organismos da macrofauna e também na interface serrapilheira-solo (Aquino et al., 2006). Assim, em sistema de cana-de-açúcar com remoção total da palha, as condições restritas de umidade e disponibilidade de alimento, influenciam negativamente sobre a quantidade e diversidade da fauna do solo (Abreu et al., 2014; Portilho et al., 2011).

A fauna do solo apresenta papel fundamental na regularização da densidade e distribuição dos microrganismos como fungos e bactérias, que são os decompositores primários da MOS, colaborando assim indiretamente no processo de decomposição (Moreira e Siqueira, 2006).

A macrofauna, representada por organismos com diâmetro corporal entre 2 e 20 mm), composta por organismos como cupins, formigas, besouros e minhocas, entre outros, possuem uma estreita relação com a mesofauna e os microrganismos modificando suas populações. Essa relação fica facilmente visível quando as minhocas, por exemplo, ao se alimentar e se transportar abrem galerias dentro do solo, por onde levam resíduos da superfície para o interior do solo, onde esses podem ser decompostos pelos microrganismos (Lavelle et al., 2006). Além disso, os organismos da macrofauna podem fragmentar o material vegetal, deixando-os menores, aumentando assim a superfície de contato, facilitando a ação dos microrganismos no processo de decomposição e mineralização da MOS.

Além dessa classificação, a fauna do solo, também pode ser classificada quanto aos seus aspectos funcionais, ou seja, sua preferência alimentar. Podendo ser dividida de forma geral em: Saprófagos, predadores, micrófagos, fitófagos e insetos sociais. Os **Saprófagos**, conhecidos também como decompositores, se alimentam diretamente de resíduos de plantas, fragmentando-os. Entre os organismos que se enquadram nesse grupo estão: Diplopoda, Isopoda, Blattodea, entre outros. **Predadores:** Estes atuam no topo da cadeia alimentar edáfica, se alimentando de outros organismos menores. É o caso dos grupos Araneae, Chilopoda e Pseudoscorpionida.

Os fitófagos se alimentam da seiva das plantas. Alguns se alimentam de raízes como as larvas de coleóptera. Os micrófagos, geralmente são microartrópodes, que regulam a população microbiana, como os colêmbolos. E os insetos sociais, como as formigas e cupins, que possuem hábitos sociais, ou seja, apenas um pequeno grupo é capaz de reproduzir, enquanto os demais são responsáveis por cuidar da colônia. Esses organismos podem tanto atuar como saprófagos como predadores. Além disso, em conjunto com as minhocas, são conhecidos como “Engenheiros do Ecossistema”, por serem capazes de alterar o ecossistema, modificando a estrutura do mesmo, sem prejudicar os outros organismos. A abertura de galerias no solo, influenciando na aeração e infiltração de água e a produção de coprólitos que podem influenciar na fertilidade do solo e estruturação, são exemplos de estruturas produzidas por esses organismos, conhecidas como estruturas biogênicas (Lavelle et al., 2006).

Para facilitar a interpretação dos resultados referentes a fauna invertebrada do solo, alguns autores avaliam a abundância (números de indivíduos) e a diversidade de grupos (número de grupos encontrados) que compõem a fauna invertebrada epigeica e edáfica. Além disso, são utilizados índices, a saber: diversidade de Shannon e equabilidade de Pielou, os quais remetem a proporção do grupo *i* no total da amostra (Shannon & Weaver 1949) e a uniformidade da comunidade (Pielou 1977), respectivamente.

A fauna invertebrada edáfica e epigeica do solo são sensíveis ao manejo da quantidade de palhada, em áreas com colheita mecânica sem queima. De acordo com Abrão (2012), no município de Itaporã-MS, os efeitos da manutenção de 50% ou 100%, da palhada sobre a superfície do solo, sobre os índices de riqueza e diversidade da fauna do solo são semelhantes, e apresentaram uma tendência a se equipararem à vegetação natural (controle) e, provavelmente, favorece o funcionamento da vida no solo. Entretanto, a retirada completa da palhada da superfície do solo promove a redução da riqueza e diversidade dos organismos da macrofauna invertebrada edáfica e epigeica, quando comparada aos tratamentos que mantiveram 50 e 100% da palhada.

A época de avaliação da fauna do solo também pode influenciar no número de indivíduos. Onde no período seco, a elevada temperatura e baixa umidade, contribuem para redução dos números de indivíduos (Abreu et al., 2014). Provavelmente, isso ocorre devido a redução da oferta de alimentos que limita a existência de alguns grupos, restando apenas os mais adaptados as condições de déficit hídrico e temperatura alta (Souto et al., 2008).

Os resultados obtidos por Abreu et al. (2014), em experimento com diferentes quantidades de palhada da cana-de-açúcar, a saber: 0 %, 25 % (2,2 Mg ha⁻¹), 50% (5,1 Mg ha⁻¹), 75% (7,8 Mg ha⁻¹) e 100% (12 t ha⁻¹), depositado sobre o solo, no município de União-Pi, em um Plintossolo Argilúvico de textura arenosa, comprovam o efeito da época de amostragem (seca ou chuvosa) sobre o número de indivíduos, riqueza de espécies, índice de Shannon e índice de Pielou. Além disso, observaram que maior diversidade de grupos de fauna epigeica no tratamento com manutenção de 100% de palha. Certamente por proporcionar um microclima mais favorável a habitação e exploração desses grupos e ainda devido a maior disponibilidade de alimento.

A maioria dos estudos com fauna invertebrada epigeica do solo em diferentes condições de uso e manejo do solo reportam a alta sensibilidade dessa as alterações nos sistemas agrícolas (Guimarães et al., 2016; Brito et al., 2016; Abreu et al., 2014). Outra avaliação em comum é que as condições climáticas na época de amostragem também atuam fortemente na densidade e distribuição relativa dos grupos. O maior número de indivíduos em períodos chuvosos é mais comum. A maior distribuição relativa geralmente é representada pelos grupos Collembola, Formicidae e Diptera, o que indica que esses grupos possuem alta capacidade de adaptação nos sistemas naturais e agrícolas.

Os grupos Collembola e Formicidae também são muito sensíveis às mudanças de clima. Em época de maiores precipitações é mais comum o maior número de Collembola do que em época seca, porém isso ocorre de maneira contrária com o grupo Formicidae. Os colêmbolas apresentam papel fundamental na ciclagem de nutrientes do sistema pois são decompositores (Abreu et al., 2014). Já as formigas têm influência direta nos atributos físicos do solo, já que são conhecidas como engenheiras dos ecossistemas. O que evidencia a influência da fauna do solo sobre os aspectos químicos e físicos do solo.

A representatividade da macrofauna do solo na fração viva da matéria orgânica é de 15 a 30 % (Moreira e Siqueira, 2006). A maior parte da matéria orgânica viva (60-80%) é composta por microrganismos (menores que 5.10⁻³ mm³) como fungos, bactérias, actinomicetos, leveduras e microfauna (protozoários). Assim, a parte viva da matéria orgânica do solo é protoplasma microbiano, representando a biomassa microbiana. Sendo essa a

principal fonte de enzima no solo, responsável pela quase totalidade de atividade biológica deste, catalisando as transformações bioquímicas, representando fonte e dreno de C e troca de nutrientes entre a atmosfera e o ecossistema solo-planta (Moreira e Siqueira, 2006).

Em revisão bibliográfica abordando o efeito do manejo da palhada cana-de-açúcar sobre os atributos biológicos do solo, Oliveira et al. (2014), relatam que a maioria dos trabalhos sobre esse assunto são com carbono da biomassa microbiana (CBM). Sendo considerado como principal indicador da qualidade do componente biológico do solo. A maioria dos trabalhos (Galdos et al., 2009; Robertson e Thorburn, 2007; 2001; Graham et al., 2001; Mendonza et al., 2000), observaram que a manutenção da palhada sobre a superfície do solo resulta em maiores teores de CBM em relação as áreas que queimam a palhada.

O aumento dos teores de CBM, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar sem queima da palhada em comparação a áreas que queimam, ocorre principalmente em razão das melhores condições ambientais para o desenvolvimento da população microbiana. A maior temperatura do ar e a maior precipitação também favorecem a biomassa microbiana, o que justifica os maiores teores de CBM encontrados por Mendonza et al. (2000), e Robertson e Thorburn (2007), em Linhares-ES e em Mackay e Tully (Austrália), respectivamente. Em ambos os trabalhos os autores reforçam a ideia de que em áreas sem queima dos resíduos os microrganismos encontram abundância de substrato para o seu desenvolvimento.

Assim, observa-se um consenso que tanto a fauna invertebrada quanto os microrganismos do solo são sensíveis ao manejo da palhada da cana-de-açúcar e as condições de clima que são expostas (Carvalho et al., 2016). As determinações referente à essas ferramentas importantes no monitoramento dos efeitos da remoção dos níveis de palha da cana-de-açúcar do solo em diferentes condições edafoclimáticas e ao longo tempo.

3 CAPÍTULO I

MANEJO DE PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR E QUALIDADE DO SOLO, PRODUÇÃO DA CULTURA E EMISSÃO DE N₂O EM COLORADO-PR

3.1 RESUMO

A grande quantidade de massa seca de palha produzida nos canaviais com manejo sem queima (colheita mecânica) da cana-de-açúcar tem chamado a atenção dos produtores e usinas para a remoção da palha para produção de bioenergia ou álcool de segunda geração. Entretanto, não se sabe ao certo, a quantidade de palha que pode ser removida sem causar danos a qualidade do solo e ao rendimento da cultura ao longo do tempo. A colheita mecânica da cana-de-açúcar favorece a compactação do solo. Uma forma de minimizar esse impacto é o controle do tráfego de máquinas, bem como, o uso do espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 x 1,5 m). Assim, o objetivo do estudo foi avaliar, em dois anos consecutivos, o efeito de quatro níveis de deposição da palha (0, 25, 50 e 100 %), nas linhas sem (0,9 m) e com (1,5 m) tráfego em sistema de plantio duplo alternado (0,9 X 1,5 m), sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, sobre a emissão de óxido nitroso e produtividade da cana-de-açúcar no município de Colorado (PR). A área de estudo é de Latossolo Vermelho de textura franco arenosa, localizada na região Sul do país, no município de Colorado (PR). Os resultados indicam que as respostas nas linhas com e sem tráfego geralmente são distintas aos níveis de palha. No primeiro ano de avaliação, a quantidade de palha mais eficiente em aportar C e N, na camada de 0-5 cm, é de 100% (14,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) na linha não trafegada e de 50% (7,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha na linha trafegada. Mas, no segundo ano, a manutenção de 100% resulta em valores mais elevados de N no solo, em ambas as linhas. O efeito da remoção de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo nos atributos químicos e físicos do solo é influenciado pelo tráfego de máquinas, pois, a manutenção de 100% de palha nas condições edafoclimáticas da área de estudo potencializou a compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas na linha de 1,5 m e a emissão de óxido nitroso logo após a adubação nitrogenada. Em relação a fauna invertebrada epigeica do solo, a mesma é sensível ao manejo dos níveis de palha, onde a manutenção de 100% de palha aumenta a diversidade e equitabilidade dos grupos. A manutenção de 50% de palha favorece a produtividade da cultura, a agregação do solo bem como o maior aporte de fração leve livre nos primeiros 10 cm de espessura do solo. Após dois anos de experimento, a manutenção de 25 % e 50% de palha resultou em maiores rendimentos de colmos e conseqüente extração de nutrientes, o que favoreceu o aumento da acidez do solo e diminuição dos teores de fósforo assimilável, nas linhas trafegadas em camadas mais profundas (30-40 e 60-100 cm). Os resultados obtidos indicam que na região Sul do país, sob sistema de plantio duplo combinado, a quantidade de palha da cana-de-açúcar mais adequada para manutenção da qualidade do solo e do rendimento da cultura é de 50% (7,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha. Recomenda-se o acompanhamento desse experimento por um maior período de tempo visando solidificar a recomendação feita nesse estudo.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. Fração leve. Espaçamento duplo alternado. Produtividade. Gases do efeito estufa. Latossolo Vermelho.

3.2 ABSTRACT

The large amount of dry mass of straw produced in sugarcane-managed without burning (mechanical harvesting) has drawn the attention of producers and mills to the removal of straw for the production of bioenergy or second generation alcohol. However, the amount of straw that can be removed without causing soil quality and crop yield over time is uncertain. Mechanical harvesting of sugarcane favors soil compaction, which minimizes impact on the control of machine traffic, as well as the use of alternate alternating planting spacing (0.9 X 1.5 m). Thus, the objective of the study presented in this chapter was to evaluate, in two consecutive years, the effect of four levels of straw deposition (0, 25, 50 and 100%) on the lines without (0.9 m) and (1,5 m) traffic in alternating double plantation system (0.9 X 1.5 m), on the chemical, physical and biological attributes of the soil, on the emission of nitrous oxide and sugarcane productivity in the first and second ratoon of variety RB 867515. The study area is a sandy loam textured Oxisol, located in the southern region of the country, in the municipality of Colorado (PR). The results indicate that the responses in the lines with and without traffic are generally different from the straw levels. First year of evaluation, the amount of straw that is most efficient in the supply of C in the 0-5 cm layer is 100% (14.85 Mg ha⁻¹ year⁻¹) in the unripened line and 50% (8.5 Mg ha⁻¹ year⁻¹) of straw in the line trafficked to store C and N in the soil. But in the second year, maintaining 100% results in higher N values in the soil, in both lines. The effect of the removal of different straw levels on the soil surface in soil chemical and physical attributes is influenced by machine traffic. Where the maintenance of 100% straw associated with the soil's climatic conditions enhances the soil compaction caused by the traffic of machines in the 1.5 m line and the emission of nitrous oxide soon after nitrogen fertilization. In relation to the epigeic invertebrate fauna of the soil, it is sensitive to the management of straw levels. Where maintaining 100% straw increases the diversity and equitability of the groups. The maintenance of 50% of straw favors the aggregation of the soil as well as the greater contribution of free light fraction in the first 10 cm of soil thickness. The maintenance of 25% and 50% of straw results in higher yields of stalks and consequent nutrient extraction, which favors the increase of soil acidity and decrease of assimilable phosphorus content in lines transported in deeper layers (30-40 and 60-100 cm) after two years of experiment. Thus, the results indicate that in the southern region of the country, under a combined double plantation system, the amount of sugarcane straw most adequate to maintain soil quality and crop yield is 50% (7.85 Mg ha⁻¹ year⁻¹) of straw. In addition, it is suggested to monitor this study for a longer time to see if the recommended dose is 50%.

Key words: Straw Retreat. Light fraction contribution. Soil attributes. Productivity. Greenhouse gases.

3.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma área colhida de 8,77 milhões de hectares (Conab, 2017). A cana é matéria prima principalmente para produção de álcool, açúcar, vinhaça, energia térmica, produção de gás carbônico (CO₂) puro. Com isso, apresenta um balanço energético altamente positivo, sendo a cultura da cana considerada estratégica do ponto de vista econômico e ambiental. Na parte ambiental destaca-se a substituição do combustível fóssil por biocombustível, o uso do bagaço e da palha para produção de energia, e a prática da colheita sem queima (mecânica) que deixa de emitir gases do efeito estufa (GEE) e ainda sequestra carbono no solo graças ao aporte de palhada sobre o solo.

A colheita sem queima e mecanizada deixa sobre o solo de 10 a 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de palha (Schultz et al., 2010). O que forma uma densa camada de resíduos sobre a superfície, que geralmente traz benefícios aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Como o aumento e manutenção dos teores de C, a ciclagem de nutrientes via mineralização da palha e consequente disponibilidade às plantas, aumento da agregação, porosidade e consequentemente maior infiltração da água no solo, aumento da manutenção da umidade, controle dos processos erosivos, e ainda favorece a fauna e microflora do solo.

Contudo, na região sul do país, a cana-de-açúcar colhida no início da safra (maio e junho) tem seu crescimento retardado devido as baixas temperaturas da região e em razão da palha proporcionar temperaturas ainda mais baixas ao solo (Awe et al., 2015). Essa condição desacelera a taxa de decomposição da palha, permitindo o seu acúmulo por mais tempo no campo. Além disso, a palhada funciona como uma barreira física ao surgimento da planta. Mas, durante os meses de outubro e novembro (final do pico da safra) as temperaturas e os índices pluviométricos são mais elevados. A maior precipitação nesse período, condiciona o alto teor de umidade do solo, ou seja, um teor acima da faixa de friabilidade do solo. Nessa condição, a compactação do solo devido ao tráfego de máquinas é mais intensa, o que reduz o rendimento e a longevidade da cultura.

O maior espaço poroso saturado por água associado a manutenção da palha no campo também favorece a perda de nitrogênio na forma de óxido nitroso (N₂O) através do processo de desnitrificação. Esse processo é ainda mais intenso logo após a adubação nitrogenada e com a aplicação da vinhaça (Carmo et al., 2013), o que contribui negativamente ao balanço energético da cultura e positivamente ao aquecimento global, uma vez que o N₂O é um GEE com potencial de aquecimento 296 vezes maior que o CO₂.

Com intuito de diminuir o efeito negativo da colheita mecânica principalmente sobre os atributos físicos do solo e o número de rodados no canavial, não só na região sul, mas em todo o centro-sul do país tem-se adotado o plantio em espaçamento duplo combinado (0,9x1,5 m). Onde a colhedora colhe duas linhas de plantio ao mesmo tempo, trafegando sempre nas linhas com espaçamento de 1,5 m, nesse sentido as linhas com 0,9 m são fisicamente preservadas desse tráfego.

Na região sul do país a retirada de parte da palha pode ser favorável ao desenvolvimento e balanço energético da cana. E algumas usinas já tem recolhido 50 % da palha para geração de energia e álcool de segunda geração. Contudo, o efeito do recolhimento de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre a segurança do solo e produtividade da cana-de-açúcar na região sul do país é escasso.

Assim, o objetivo geral desse capítulo foi propor a quantidade de palha que proporcione a manutenção e/ou melhoria da qualidade de solo (Latossolo Vermelho, textura

franco-arenosa) e a longevidade da cultura da cana-de-açúcar, em sistema de cultivo duplo combinado (0,9 x 1,5 m) na região sul do país. Mais especificamente, visa avaliar o efeito da deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%, que correspondeu a deposição de 0, 3,7; 7,8 e 14,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de palha, respectivamente) sobre: **a)** os atributos químicos e físicos do solo, os teores de C e N, e aporte de fração leve na matéria orgânica do solo, nas linhas trafegadas (1,5 m) e não trafegadas (0,9 m) em cultivo duplo combinado; **b)** a emissão de N₂O; **c)** a comunidade da fauna epigeica do solo; e **d)** produtividade de colmos.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição da área experimental

A pesquisa foi realizada em área experimental pertencente à Usina Alto Alegre S/A, no município de Colorado (PR) (coordenadas geográficas: 22°55'0.7" S, 51°51'49.2" W). O clima do local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Ama (Tropical com inverno seco), com precipitação pluviométrica média anual de 1.501 mm e temperatura média máxima e mínima de 28,4 e 17,8 °C, respectivamente. Os dados de precipitação do período deste estudo são apresentados na Figura 1.

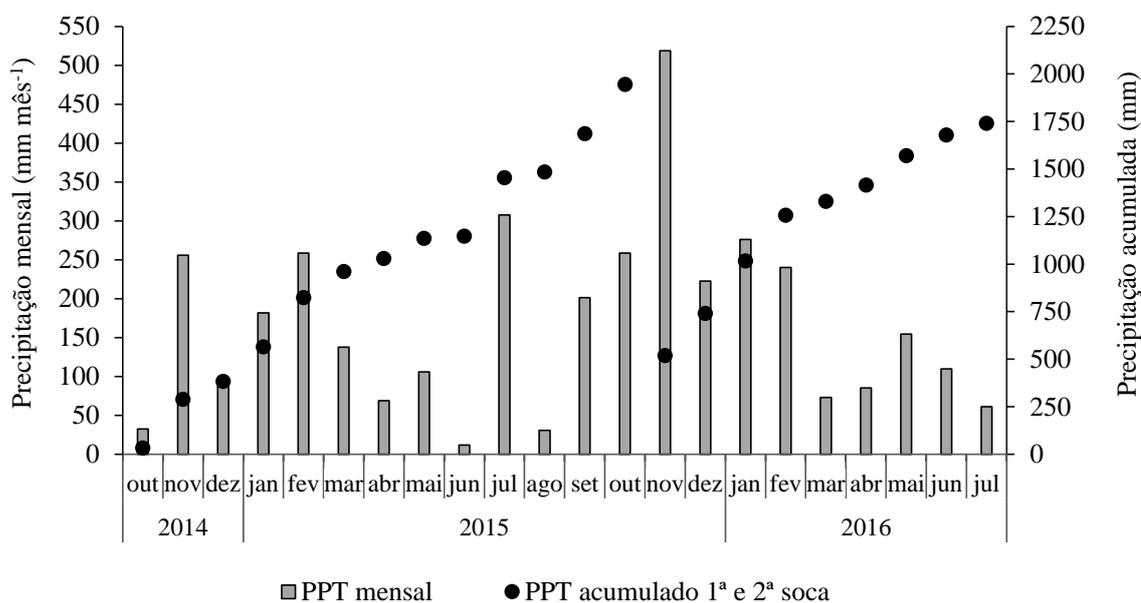


Figura 1. Precipitação pluviométrica durante as socas 2014/2015 (1ª soca) e 2015/2016 (2ª soca), em área experimental pertencente à Usina Alto Alegre S/A, no município de Colorado (PR).

3.4.2 Histórico do uso e manejo da área

O experimento foi implantado em área de cana-de-açúcar com colheita mecânica (sem queima), em novembro de 2014, 15 dias após a colheita da cana-planta. O preparo de solo utilizado no plantio do canavial foi o preparo profundo e canterizado do solo utilizando um equipamento denominado de Penta – MAFES. Este equipamento, possui as funções de subsolar com uma haste que trabalha a uma profundidade efetiva de 70 cm, possuindo uma caixa para aplicação de corretivos/adubos em profundidade, uma enxada rotativa destorroadora, que incorpora insumos de 30 a 40 cm de profundidade, e um aleirador, que conduz a palha restante da colheita da cana-de-açúcar no sentido da haste e da enxada rotativa, com a função de incorporá-la ao solo. Por possuir essas cinco funções o aparelho foi denominado de Penta: subsola, aplica corretivo, aleira a palha, incorpora e destorroa.

Desse modo, o preparo de solo em profundidade ocorreu somente na faixa onde foi realizado o plantio no espaçamento combinado (1,50 m x 0,90 m). A adubação de plantio (setembro 2013) foi constituída de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 150 kg ha⁻¹ de fósforo e 120 kg ha⁻¹ de potássio. Nas soqueiras (2014, 2015 e 2016), fez-se a adubação como descrita no item 3.4.12.

O canavial estava sendo cultivado com sistema de colheita da cana-de-açúcar sem a queima prévia do canavial e com colheita mecânica há mais de dez anos. A variedade utilizada foi RB-867515, a qual apresenta hábito de crescimento ereto, é caracterizada pela alta produtividade agroindustrial, com ótima adaptabilidade e estabilidade de produção em solos de baixa fertilidade natural e com baixa capacidade de retenção de água, apresentando ainda um índice de perfilhamento regular e brotação da cana-planta e soca muito boa.

3.4.3 Tratamentos e delineamento experimental

A média dos valores de palha depositados sobre o solo, nos dois anos de experimento, foram: 0; 0,37; 7,85 e 14,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Onde no primeiro e segundo ano foram aplicados 0; 3,65; 7,55 e 14,85 Mg ha⁻¹ e 0; 3,90; 8,15 e 14,85 Mg ha⁻¹, respectivamente, que corresponderam, à manutenção em campo de 0, 25, 50 e 100% da palha (folhas secas, ponteiros e restos de colmo).

A aplicação dos tratamentos, em novembro de 2014 e em outubro de 2015, foi realizada logo após a colheita de cana planta e 1ª soca, respectivamente.

Para determinação do peso de palha das parcelas experimentais correspondentes aos níveis com 25%, 50% e 100% de palha sobre o solo, após a colheita da cana planta e da 1ª soca, toda a palhada remanescente dentro de cada parcela foram pesadas (Figura 2A) e, em seguida, espalhada na área obedecendo às quantidades determinadas para as mesmas. Nas parcelas correspondentes a 0% de palha, removeu-se toda a palhada presente na área.



Figura 2. Detalhes da área experimental pertencente à Usina Alto Alegre S/A, em Colorado (PR) com a demonstração da aplicação dos tratamentos através do acúmulo e pesagem da palhada da cana-de-açúcar (A) e; o cultivo da cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado (0,9 X 1,5 m) (B).

As parcelas experimentais foram compostas por oito linhas de 10 m de comprimento, em espaçamento duplo alternado (0,9 X 1,5 m) (Figura 2B), o que resultou em uma área de 96 m²/parcela, conseqüentemente, numa área total de 1536 m² (16 parcelas). O croqui da área experimental pode ser observado na Figura 3. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições.

Como área de referência, utilizou-se uma área de floresta secundária (mata), localizada a aproximadamente 500 m do experimento com manejo da palhada da cana-de-açúcar.

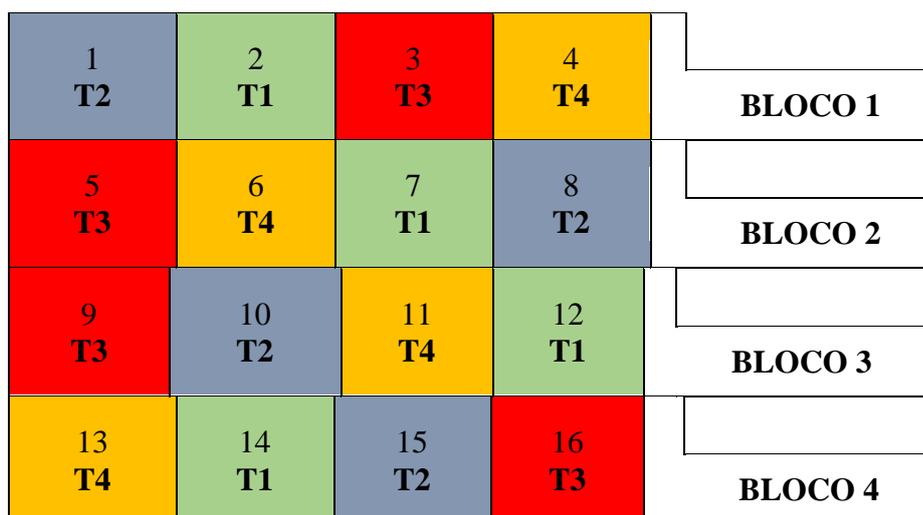


Figura 3. Croqui do experimento com manejo da palhada da cana-de-açúcar em sistema de plantio com espaçamento duplo alternado (0,9 X 1,5 m), em Colorado- PR (Usina Alto Alegre S/A- 2014), instalado em 03/11/2014. Tratamentos: T1: cana colhida crua, com 100% de palha sobre a superfície do solo; T2: cana colhida crua, com 50% de palha sobre a superfície do solo (remoção de 50% da palhada); T3: cana colhida crua, com 25% de palha sobre a superfície do solo (remoção de 75% da palhada); T4: cana colhida crua, com 0% de palha sobre a superfície do solo (remoção de toda palhada).

3.4.4 Caracterização do perfil do solo em Colorado-PR

A caracterização morfológica do solo (Santos et al., 2005) foi realizada em uma área de mata secundária, situada a aproximadamente 500 m da área experimental, através da abertura de um trincheira com auxílio de um enxadão. A caracterização física e química (EMBRAPA, 1997), dos horizontes do perfil de solo, coletado nessa área de mata, em Colorado- PR, foi realizada no tempo zero (novembro de 2014).

O perfil do solo apresentou sequência de horizontes A-BA-Bw, com horizonte superficial A com 22 cm de espessura. Em todos os horizontes verificou-se a estrutura do tipo granular e matiz 10R (Tabela 1). A consistência analisada, quando seca, foi ligeiramente dura em todos os horizontes e, quando úmida, esteve entre muito friável e friável, e quando molhada, foi ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, também para todos os horizontes.

Em todos os horizontes, os teores de argila foram inferiores a 222 g kg⁻¹, possivelmente, em razão da natureza do material de origem (Tabela 2).

O grau de flocculação nos horizontes estudados foi inferior a 65 %. Os valores de densidade do solo (Ds) variaram de 1,28 a 1,49 Mg m⁻³ (Tabela 3). A porosidade total variou de 41,15 a 50,08 %, acompanhando as variações observadas na Ds.

Tabela 1. Principais atributos morfológicos do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado-PR.

Horiz.	Prof (cm)	Cor	⁽¹⁾ Estrutura	Consistência			Textura
				⁽²⁾ Seca	⁽³⁾ Úmida	⁽⁴⁾ Molhada	
A1	0-22	10R 3/3	F, P, G	LD	MF/F	LPL e LPe	Franco Argilo Arenosa
BA	22-56	10R 3/6	F, P, G	LD	F	LPL e LPe	Franco Argilo Arenosa
Bw	56-97 ⁺	10R 3/6	F, P, G	LD	F	LPm L e LPe	Franco Argilo Arenosa

⁽¹⁾ Estrutura: grau de desenvolvimento (F: fraco, M: moderado), tamanho (MP: muito pequeno, P: pequeno, M: médio), tipo (G: granular, BS: blocos subangulares, BA: blocos angulares). ⁽²⁾ Consistência no estado seco (M: macia, LD: ligeiramente dura, D: dura, MD: muito dura, ED: extremamente dura). ⁽³⁾ Consistência no estado úmido (MF: muito friável, F: friável, Fr: firme, EFr: extremamente firme). ⁽⁴⁾ Consistência no estado molhado (PL: plástico, LPL: ligeiramente plástica, LPe: ligeiramente pegajosa, Pe: pegajosa).

Os valores de pH em água variaram entre 4,7 e 5,0 (Tabela 4). Nos horizontes BA e Bw, observaram-se maior acidez e teor de Al^{+3} do que no horizonte A. Além disso, verificaram-se que os valores de bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+}) decresceram do horizonte A para os horizontes B, assim a soma de bases e o valor V% também seguiram esse padrão (Tabela 4). Os solos que apresentam valores saturação de bases inferiores a 50% ($V < 50\%$) nos horizontes diagnósticos subsuperficiais são identificados como solos distróficos (Santos et al., 2013).

O perfil do solo apresentou horizonte diagnóstico superficial A moderado, sobrejacente a um horizonte B com gradiente textural de 0,98, estrutura fraca pequena granular, espessura maior que 50 cm, textura franco argilo arenosa, capacidade de troca de cátions menor que $17\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$ de argila, caracterizando um horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico. Assim, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos et al., 2013) o perfil do solo é classificado no 1º nível categórico (ordem) como Latossolo e no 2º nível categórico (subordem) como Latossolo Vermelho, pois apresenta matiz 10R nos horizontes BA e Bw.

Tabela 2. Granulometria, argila dispersa em água, grau de floculação e relação silte/argila do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado –PR.

Horiz.	Prof. (cm)	Granulometria (g kg ⁻¹ TFSA)			Argila Dispersa em água (g kg ⁻¹ TFSA)	Grau de Floculação (%)	Silte/Argila
		Areia	Silte	Argila			
A1	0-22	729	49	222	98	56	0,22
BA	22-56	747	35	218	76	65	0,16
Bw	56-97 ⁺	748	36	216	99	54	0,17

Tabela 3. Densidade do solo, densidade da partícula e porosidade total do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado –PR.

Horiz.	Prof. (cm)	Densidade (Mg m ⁻³)		Porosidade Total (%)
		Solo	Partícula	
A1	0-22	1,28	2,56	50
BA	22-56	1,49	2,53	41
Bw	56-97 ⁺	1,45	2,57	43

Tabela 4. Atributos químicos, teor de carbono orgânico e valores do complexo sortivo do perfil do solo, coletado em área de mata secundária, em Colorado -PR

Horiz.	Prof (cm)	pH em água (1:2,5)	Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)								COT (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	V%
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ⁺³	H+Al	CTC			
A1	0-22	5,0	0,80	0,70	0,22	0,00	1,72	0,65	4,50	6,22	13,7	1,3	27,6
BA	22-56	4,7	0,20	0,20	0,02	0,00	0,42	1,10	3,10	3,52	3,2	8,2	11,9
Bw	56-97 ⁺	4,8	0,05	0,25	0,01	0,00	0,30	1,22	2,40	2,70	1,5	0,0	11,2

COT: carbono orgânico total; SB: soma de bases (SB= Ca²⁺+ Mg²⁺+ K⁺+ Na⁺); CTC = (SB + H+Al); V = 100 SB/CTC; segundo metodologia Embrapa, 1997.

3.4.5 Produtividade e parâmetros tecnológicos

Foram determinados os parâmetros tecnológicos do caldo e da cana nos tratamentos referentes à colheita do ano de 2015 e 2016. As análises agroindustriais foram realizadas no laboratório da destilaria Alto Alegre S/A. Na colheita, para cada faixa, foram delimitadas 2 sub-parcelas de 4,8 m² de área (referente as linhas de 1,5 e 0,9 metros de largura, com 2 metros de comprimento). Nas canas cortadas nas sub-parcelas, os colmos, ponteiros e as folhas foram pesados para cada parcela, determinando-se a produtividade de massa fresca (Mg ha⁻¹).

3.4.6 Caracterização das propriedades químicas e físicas do solo

A amostragem do solo foi realizada em três momentos distintos: no tempo zero (T0), antes do estabelecimento dos tratamentos, um ano (T1) e dois (T2) anos após a instalação dos tratamentos, imediatamente após a colheita mecânica da cana planta (T0), cana 1^a soca (T1) e 2^a soca (T3), respectivamente.

Na coleta do tempo zero (novembro 2014), com auxílio de uma pá de retroescavadeira, foi realizada a abertura de 4 trincheiras (1,30 m de largura por 1,10 m de comprimento e 1,20 m de profundidade), escolhidas de forma aleatória, para a coleta de amostras de terra nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As amostras simples de terra foram coletadas nas três paredes do perfil referentes as linhas de 1,5 m e nas três paredes referentes ao espaçamento 0,9 m (Figura 4), constituindo uma amostra composta para cada profundidade. Esse procedimento foi realizado devido às colhedoras terem trafegado somente entre as linhas de 1,5 m de largura e a adubação das soqueiras terem sido realizadas somente nas linhas de 0,9 m de largura. Nessas mesmas paredes e profundidades foram coletadas amostras de terra indeformadas, com auxílio de um anel volumétrico (anel de Kopecky), para a determinação da densidade do solo (DS) (Embrapa, 1997).

Na área de vegetação de mata, também foi realizada a abertura de uma trincheira, com auxílio de um enxadão, para a coleta de amostras de terra deformadas e indeformadas nas mesmas profundidades descritas acima.

Na coleta de terra realizada um ano após a instalação dos tratamentos (outubro 2015) realizou-se a abertura de mini-trincheiras nas linhas com 1,5 e 0,9 m de largura, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. Na coleta realizada a aproximadamente 2 anos após a instalação do experimento (julho de 2016), coletaram-se amostras de terra deformadas e indeformadas, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, conforme foi realizado no tempo zero, porém nessa coleta realizou-se a abertura de uma trincheira em cada parcela experimental.

As amostras de terra deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de diâmetro de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida, essas amostras foram submetidas às seguintes análises químicas: pH em água, fósforo assimilável, potássio, sódio, cálcio, magnésio e alumínio trocável e acidez potencial, de acordo com a Embrapa (1997).



Figura 4. Abertura de trincheiras nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar após a colheita mecanizada da cana-planta em Colorado –PR. As setas vermelhas identificam as paredes de coleta entre o espaçamento de 1,5 m e as amarelas identificam as paredes entre o espaçamento de 0,9 m.

3.4.7 Carbono e nitrogênio no solo

Os teores de carbono orgânico total (COT) do solo foram determinados por oxidação da matéria orgânica, conforme metodologia proposta por Yeomans & Bremner (1988). Os teores de nitrogênio total (NT) foram determinados pelo método de digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995). As amostradas de TFSA foram finamente moídas em grau de porcelana.

3.4.8 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Em amostras de terra fina seca ao ar (TFSA), coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm logo após a colheita da 1ª e 2ª soqueira, nas linhas com 1,5 e 0,9 m de largura, determinou-se o peso das frações leves da matéria orgânica do solo, através do fracionamento físico densimétrico (Sohi et al., 2001). Para esse fracionamento, utilizou-se uma solução de iodeto de sódio (NaI) de 1,8 Mg m⁻³ que permitiu a flotação da fração leve livre (FLL). A FLL presente na superfície da solução de NaI foi aspirada e filtrada em sistema com vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47mm-Millipore), utilizando-se filtro de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e 2 µm de retenção. Para a determinação da FLL e FLI, foi pesado os filtros mais os resíduos orgânicos separados.

Para esse fracionamento pesou-se 5g de TFSA em tubos tipo falcon (50 mL), e acrescentou-se 35 mL de uma solução de iodeto de sódio (NaI) de 1,8 Mg m⁻³ que permitiu a flotação da fração leve livre (FLL). A FLL presente na superfície da solução de NaI foi aspirada e filtrada em sistema com vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47mm-Millipore), utilizando-se filtro de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e 2 µm de retenção. Em seguida, na mesma amostra, extraiu-se a fração leve intra-agregado (FLI) ou oclusa, após aplicação de vibração de 400 J ml⁻¹, com o emprego de ultra-som (modelo 250/ 450 Sonifier) por 3 min com pulsações de intervalo de um segundo. Após aplicação do ultrassom, aguardou-se um

tempo de sedimentação de 48 hs para então, extrair a fração leve intra-agregado (FLI) ou oclusa. As FLL e FLI retidas nos filtros foram, cuidadosamente, lavadas com água destilada, visando remover o excesso de NaI, sendo, a seguir, levadas à estufa de circulação forçada de ar para secar a 60°C, até atingirem peso constante.

3.4.9 Estabilidade de agregados

No ano de 2015 (aproximadamente um ano após a instalação do experimento), para as análises de estabilidade de agregados foram coletadas amostras indeformadas, nas entre linhas: na profundidade de 10 cm, com auxílio de pá reta. Na determinação da distribuição das classes de agregados, foi usado o tamisamento via úmida em aparelho de Yooder (1936), segundo método proposto por Kemper e Chepil (1965). O princípio de funcionamento deste método consiste em oscilações de uma haste na qual estão presentes as amostras, onde estas imergem e afloram da água em movimentos lentos, sucessivos e constantes por um período de 15 minutos.

Foram pesadas 25 g de cada amostra, que foram umedecidas lentamente com auxílio de um atomizador manual. Após isso, as amostras foram colocadas no topo de um conjunto de peneiras de malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; e 0,105 mm de abertura e levadas para o aparelho Yooder. A umidade residual das amostras de terra utilizadas na determinação da estabilidade dos agregados foi determinada fazendo o fator de correção. Após o término do tamisamento úmido, o conteúdo retido em cada uma das peneiras foi seco em estufa à 105 °C, durante 72 horas, e em seguida pesado. A classe de agregados menor do que 0,105 mm foi estimada pela diferença do peso seco inicial (já corrigido através do fator de correção) e o somatório do peso das demais classes de peneiras utilizadas. Todos esses procedimentos foram realizados conforme Embrapa (1997).

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado de acordo com a equação a seguir:

$$DMP = \sum_{i-1} (w_i d)$$

Onde: d é o valor médio dos limites, superior e inferior, de cada classe (mm); w_i é a proporção de cada classe, em relação ao total (g).

3.4.10 Fauna do solo

A coleta da fauna invertebrada do solo foi realizada no primeiro e no segundo ano após a instalação dos tratamentos (outubro de 2015 e julho de 2016, respectivamente). Para a amostragem foram utilizadas armadilhas do tipo “Pitfall” (Figura 5), constituídas de recipientes plásticos com 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Os recipientes foram enterrados no solo, com a borda ao nível da superfície, de acordo com Aquino et al. (2006). Em cada ano foi instalada uma armadilha por parcela, localizada sempre no centro da parcela, totalizando 16 armadilhas. No segundo ano de avaliação da fauna epigeica do solo, também se instalou 4 armadilhas do tipo “Pitfall” na área de mata, próxima as parcelas experimentais com os níveis de palha.



Figura 5. Instalação das armadilhas “Pitfall” nas parcelas experimentais em Colorado -PR

Em cada armadilha foram adicionados 200 mL de uma solução conservante de formol (2%) para evitar a deterioração dos insetos. Além disso, as armadilhas foram cobertas por pratos de plástico com elevação a cerca de 10 cm da superfície do solo, com objetivo de evitar que a água da chuva ou irrigação provocasse o transbordamento do conteúdo do recipiente.

As armadilhas permaneceram na área experimental durante sete dias, antes da colheita da cana. Em laboratório, o material coletado foi submetido a um processo de lavagem, a fim de retirar o excesso de solo e resíduos vegetais. O conteúdo das armadilhas foi acondicionado em frascos contendo álcool 70% e, posteriormente, foi realizada a identificação da fauna com o auxílio de uma lupa binocular. Os indivíduos foram identificados ao nível de ordem e classe, de acordo com Gallo et al. (1988).

3.4.11 Coleta de gases de efeito estufa e solo

Para a coleta de gases do efeito estufa (GEE), logo após a colheita da cana 1ª e 2ª soca (outubro 2015 e julho de 2016, respectivamente) foram instaladas as 16 câmaras coletoras, uma em cada parcela experimental.

As câmaras foram fixadas a 5 cm de profundidade do solo e, a aproximadamente, 5 cm de distância das linhas de plantio da cana-de-açúcar. Em cada câmara foi colocada a quantidade de palhada correspondente a cada tratamento (0, 25, 50 e 100% de palha), em função da área da câmara (Figura 6). No momento da coleta foi colocada uma tampa sobre as bases coletoras, promovendo a incubação do solo, de maneira a isolar o ambiente interno do externo. As amostras de GEE provenientes do solo foram coletadas em seringas de nylon de 60 mL, em intervalos de tempo pré-estabelecidos (0, 20 e 40 minutos).

As coletas de gases foram realizadas no período da manhã, durante 15 e 8 dias consecutivos, em outubro de 2015 e julho de 2016, respectivamente. O início de cada coleta ocorreu 1 dia antes da adubação de soqueira. Em cada amostragem, mediu-se a temperatura do ar no início das coletas, e a temperatura no interior da câmara no momento de fechamento e na abertura, 40 minutos posterior. Também foram medidas as temperaturas do solo a 5 cm de profundidade em quatro parcelas, uma de cada tratamento.



Figura 6. Câmara coletora de GEE inserida no solo no tratamento 2 (50% de palha sobre a superfície do solo), em Colorado (PR).

As análises das concentrações de N_2O foram realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Agrobiologia, utilizando um cromatógrafo de gás (Perkin Elmer, Autosystem) equipado com uma coluna de "Porapak Q" e um detector de captura de elétrons. O resultado da análise de cada amostra foi obtido sob o valor da integração da área de um gráfico, variando de acordo com a concentração de N_2O . Antes de cada conjunto de análises, foram injetadas amostras padrão de concentração conhecida de N_2O (312 ppbv, 400 ppbv, 800 ppbv, 1120 ppbv e 10000 ppbv), para o cálculo das concentrações de N_2O em cada amostra.

Os fluxos de N_2O consistem na diferença entre concentrações de N_2O em cada amostra das câmaras e nas amostras do ar ambiente. Inicialmente, fez-se a regressão linear entre as concentrações dos padrões e suas respectivas áreas, encontrando-se um fator de transformação da leitura das amostras para concentração. Após a conversão, os fluxos foram calculados pela equação $N_2O = dC/dt (V/A) M/V_m$, onde dC/dt é a mudança de concentração de N_2O na câmara no intervalo de incubação; V e A são respectivamente o volume da câmara e a área de solo coberta pela câmara; M é o peso molecular de N_2O e V_m é o volume molecular na temperatura de amostragem. Os fluxos são expressos em $\mu g N m^{-2} h^{-1}$.

No período de coleta do gás, coletou amostras de solo da camada mais superficial (0-10 cm) para análise dos teores de nitrogênio mineral (NO_3^- e NH_4^+) (Tedesco et al., 1995) e da umidade do solo (U) (Embrapa, 1997). Também determinou-se a densidade do solo (D_s) e densidade de partícula do solo (D_p), em amostras coletadas com anel volumétrico (Embrapa, 1997), para posterior cálculo do espaço poroso saturado por água (%EPISA) em que U é a umidade gravimétrica do solo ($g g^{-1}$); D_s é a densidade do solo ($g cm^{-3}$) e D_p é a densidade de partículas do solo ($g cm^{-3}$).

$$EPISA = \frac{(U_g \times D_s)}{V_{tp}} \times 100 \quad V_{tp} = \left(1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right)$$

3.4.12 Adubação da cana-de-açúcar

Os tratos culturais das duas socas seguiram a rotina da usina. A adubação de cobertura foi realizada em cima da palha, na quantidade de $100 kg ha^{-1}$ de N e $180 kg ha^{-1}$ de K_2O , com as fontes sulfato de amônio e cloreto de potássio. Os adubos foram pesados para cada linha de

plantio das parcelas do experimento e aplicados de forma manual a aproximadamente 15 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar. Nas linhas que foram instaladas as câmaras, para coleta de gases do efeito estufa (GEE), pesou-se a quantidade de adubo equivalente ao comprimento de cada câmara (30 cm).

3.4.13 Interpretação dos dados e avaliação estatística

O efeito dos níveis de palhada nos atributos físicos e químicos do solo, e na produtividade de colmos, palha e ponteiros, foram avaliados a partir de análises de regressão, em cada linha que compõe o espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 x 1,5 m) (linha não trafegada (0,9 m) e linha trafegada (1,5)). As equações de regressão foram selecionadas com base na significância dos coeficientes de regressão, a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade e maior valor do coeficiente de determinação (R^2). Os atributos físicos e químicos do solo também foram comparados entre as linhas trafegadas e não trafegadas através do teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os testes estatísticos foram realizados com o auxílio do programa estatístico SISVAR.

A análise dos dados de fauna invertebrada foi realizada a partir do cálculo do número de indivíduos armadilha⁻¹ dia⁻¹, seguido pelo erro padrão. Ainda foram calculados os índices ecológicos de riqueza total: número de grupos encontrados; riqueza média: número médio de grupos presentes em cada ponto amostral, por tratamento:

Shannon-Weaner:
(H) = $-\sum p_i \cdot \log p_i$,

Em que: $p_i = n_i/N$
onde n_i = abundância de cada grupo e N = abundância total

Equitabilidade de Pielou:

(e) = $H/\log S$

onde H = índice de Shannon e S = riqueza total (Odum, 1989).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Produtividade e parâmetros tecnológicos

A manutenção de 50% de palha sobre o solo resultou nas maiores produtividades nas duas soqueiras avaliadas. Na 1ª soca e 2ª soca, a produtividade de colmos seguiram modelo quadrático (Figura 7). A adição de 50% de palha (7,55 Mg ha⁻¹) sobre o solo resultou em maior produtividade de colmos (104,8 Mg ha⁻¹), na 1ª soca, principalmente em relação ao tratamento com remoção total (0%) da palha (81,9 Mg ha⁻¹). Entretanto na 2ª soca a manutenção de 25% (3,90 Mg ha⁻¹ de palha) ou 50% (8,15 Mg ha⁻¹ de palha) resultaram em produtividades semelhantes (37,93 e 38,78 Mg ha⁻¹, respectivamente) as quais foram superiores principalmente em relação ao tratamento com remoção total da palha (31,32 Mg ha⁻¹).

A queda de produtividade, em ambos ciclos avaliados, no tratamento com 100% de palha principalmente em relação ao tratamento com 50% pode ser por diversos fatores, alguns observados abaixo, como maior densidade do solo e menor porosidade total do solo (Figura 20B e 20D), na camada de 0-5 cm.

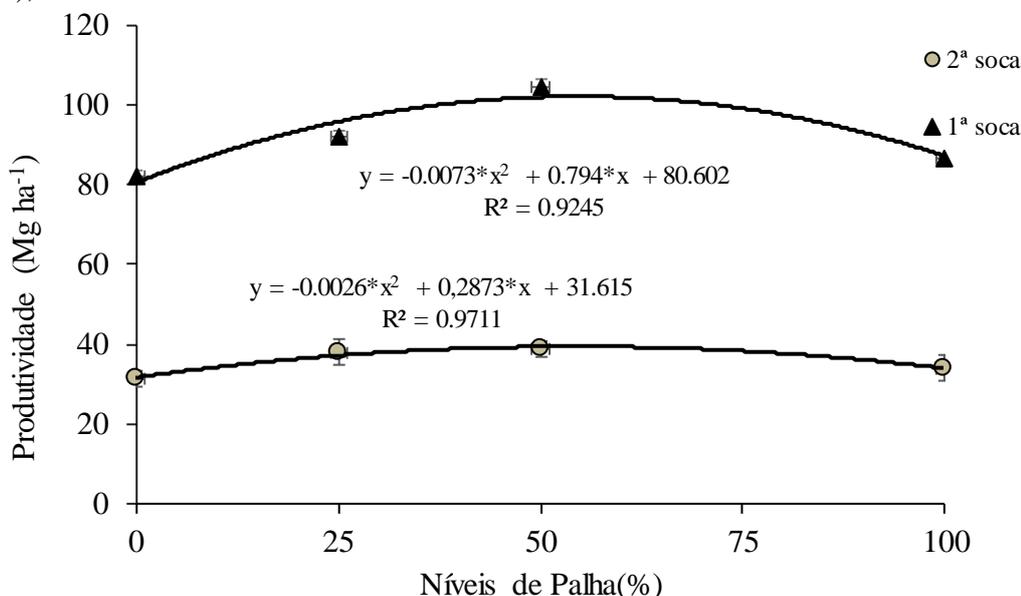


Figura 7. Produtividade de colmos frescos, em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m), com a variedade de cana-de-açúcar RB-867515, um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de experimento, com diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, em Colorado -PR. * significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo ($p > 0,01$).

Zhu et al. (2015), afirmam que maiores quantidades de palha sobre o solo (75 e 100% de palha, 11,25 e 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente), em cultivo sob rotação arroz/trigo na China, diminuiu a decomposição da palha e conseqüentemente a liberação de nutrientes para as culturas, em curto prazo, prejudicando a produtividade dessas. A imobilização do N também pode ter ocorrido no tratamento com maior quantidade de palha (100%) sobre o solo (Ramos et al., 2016), diminuindo a disponibilidade de N à cultura afetando negativamente a produtividade de colmos.

Por outro lado, Jiang et al. (2017), em área sob 5 anos de cultivo de milho, no nordeste da China, verificaram que quanto maior a aplicação de palha sobre o solo maior era o rendimento da cultura, sendo o ganho de rendimento de 11 e 21%, com a aplicação de 50% (4 Mg ha⁻¹) e 100% (8 Mg ha⁻¹) de palha, respectivamente, em relação ao tratamento sem incorporação de palha. Entretanto o tratamento 100% de palha correspondeu a 8 Mg ha⁻¹ de massa seca, a qual pode ser comparada com a dose de 50% de palha (7,85 Mg ha⁻¹) de cana-de-açúcar desse estudo, a qual também apresentou o maior rendimento de colmos. Com base nesse e outros estudos (Zhao et al., 2016; Aquino et al., 2015; Zhu et al., 2015), fica claro que as porcentagens de palha são muito dependentes de cada cultura e da condição específica de cada cultivo.

A perda de qualidade física do solo também prejudica o rendimento de colmos da cana-de-açúcar. Silva Junior et al. (2013), em experimento com diferentes sistemas de preparo num Latossolo Vermelho distrófico (textura argilosa), situado em Rio Brillante (MS), observaram que o aumento da densidade do solo e da resistência à penetração de raízes provoca redução da produtividade de colmos de uma safra para outra.

A imobilização do N também pode ter ocorrido no tratamento com maior quantidade de palha sobre o solo (Ramos et al., 2016), diminuindo a disponibilidade de N à cultura afetando negativamente a produtividade de colmos.

Contudo, Robertson e Thorburn (2007), acreditam que após alguns anos de estabelecimento do sistema sem queima, com deposição de toda a palhada sobre a superfície do solo, ocorra uma diminuição da dose de N aplicada via fertilizantes de (15 a 40 kg de N ha⁻¹), pois esperava-se que o aumento de C e N total do solo, em 8-15% e 9-24% contribua no fornecimento de N a cultura.

A manutenção de 50% de palha (10 Mg ha⁻¹) sobre superfície do solo, também foi suficiente para proporcionar aumento da produtividade da cana-de-açúcar (Aquino et al., 2015) em Bandeirantes-PR. Porém, segundo esses autores, o efeito positivo dos maiores níveis de palha no solo sobre a produtividade de colmos só é efetivo quando ocorre período de estiagem na fase de desenvolvimento da cultura, fato também apontado por Urquiaga et al. (1991), em experimento com cana crua e queimada.

A queda brusca de aproximadamente 60%, na produtividade de colmos, na 2ª soca (35,5 Mg ha⁻¹) em comparação a 1ª soca (91,5 Mg ha⁻¹), possivelmente ocorreu por dois principais motivos: 1) antecipação de 3 meses da colheita devido a aplicação de maturadores químicos próximos a área experimental; 2) excesso de precipitação (1250 mm), na fase inicial do desenvolvimento da 2ª soca (nov. 2015 à fev. 2016) (Figura 1), atípico para a região.

Os valores médios para análise tecnológica do caldo do colmo (°Brix; Teor de Fibra; Polarização = Pol; Pureza; Açúcares Redutores Totais = A.R.T.; Açúcares Redutores = A.R.; Açúcares Totais Recuperáveis = ATR; e pH) (Tabela 5), não apresentaram diferença significativa em relação ao sistema de manejo da palhada. O que corrobora com os resultados encontrados por Aquino et al. (2018), que também verificaram que diferentes níveis de manutenção de palha sobre o solo não alteram a qualidade industrial da cana-de-açúcar (variedade SP 801816).

Tabela 5. Análise tecnológica do caldo e colmo de cana-de-açúcar da variedade RB86-7515 cultivada em sistema duplo combinado (0,9 x 1,5 m), em 1ª soca, sob diferentes níveis de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100 %).

Tratamentos	°Brix	Pol	Pureza	Fibra	A.R.T	A.R.	ATR	pH
	-	%	kg t ⁻¹	-
0%	21,01	15,51	87,62	12,58	16,85	0,53	152,54	5,36
25%	21,08	15,36	86,16	12,36	16,75	0,58	151,55	5,36
50%	20,43	15,04	86,93	12,30	16,39	0,56	148,33	5,40
100%	20,87	15,60	88,26	12,24	16,94	0,52	153,30	5,40
Média Geral	20,84	15,46	87,69	12,34	16,81	0,53	152,10	5,38
CV%	2,60	3,69	2,39	2,49	3,33	11,27	3,33	0,66

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Tratamentos = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%) ; Pol = Polarização, A.R.T. = açúcares redutores totais A.R.= açúcares redutores, ART= açúcares recuperáveis totais.

3.5.2 Propriedades químicas do solo no tempo zero

A caracterização química do solo, no tempo zero (antes do estabelecimento dos tratamentos deste estudo), em área de cana-de-açúcar e em uma área testemunha (área sob vegetação de mata) pode ser observada nas Tabelas 6 e 7. De maneira geral, os valores de cátions trocáveis (Ca+Mg, K⁺), fósforo disponível e pH em água, são semelhantes nos tratamentos da área de cultivo com cana-de-açúcar (1,5 m e 0,9 m), sendo esses valores maiores que os da área de mata. Entretanto, os valores de Al³⁺ são mais elevados na área de vegetação de mata quando comparado com a área sob cultivo de cana-de-açúcar. Esse resultado reflete o efeito da calagem e adubação de plantio, que foram realizadas na área de cultivo de cana-de-açúcar, e confirma a baixa fertilidade natural do solo, a qual foi verificada na área de mata.

Contudo, os valores de carbono orgânico total (Tabela 6), em especial na camada de 0-5 cm, são mais elevados na área de vegetação de mata do que na área de cana-de-açúcar (1,5 m e 0,9 m).

Tabela 6. pH em água, acidez potencial, alumínio trocável e cálcio mais magnésio trocáveis, em solo sob cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m) e sob vegetação de mata, em Colorado –PR

Prof. (cm)	pH em água (1:2,5)			H+Al			Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹			Ca+Mg		
	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA
0-5	6,63	6,33	4,88	1,55	1,80	4,20	0,20	0,23	1,10	2,15	2,25	1,50
5-10	6,28	5,92	4,77	1,30	1,75	3,20	0,19	0,14	1,50	2,45	2,65	0,80
10-20	6,15	5,99	4,71	1,95	1,60	3,10	0,00	0,16	0,95	2,40	2,30	0,60
20-30	6,13	5,69	4,75	1,75	1,65	2,90	0,08	0,10	0,93	2,40	2,25	0,40
30-40	6,04	6,12	4,63	1,50	1,40	3,10	0,00	0,08	1,30	2,30	1,90	0,30
40-60	6,03	6,06	4,77	1,25	1,30	2,80	0,18	0,14	1,06	2,10	1,50	0,50
60-80	5,64	5,28	4,77	1,55	1,25	3,30	0,19	0,29	1,21	1,65	0,75	0,30
80-100	5,18	5,39	4,73	1,50	1,65	3,00	0,37	0,51	1,25	1,40	1,10	0,30
Média Geral	6,01	5,84	4,75	1,54	1,55	3,20	0,15	0,21	1,16	2,11	1,84	0,59

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m).

Tabela 7. Potássio trocável, fósforo disponível e carbono orgânico total do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado –PR

Prof. (cm)	K ⁺			P disponível			C (org)		
	cmol _c kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹		
	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA
0-5	0,37	0,34	0,12	13,28	13,50	1,05	7,43	7,12	11,60
5-10	0,30	0,31	0,08	12,81	29,99	0,29	7,01	7,06	6,70
10-20	0,22	0,26	0,07	23,35	14,82	0,43	6,72	6,21	6,15
20-30	0,19	0,22	0,03	33,36	24,92	0,43	6,19	6,61	7,10
30-40	0,20	0,21	0,02	3,29	6,49	0,29	5,50	5,29	5,38
40-60	0,19	0,16	0,01	3,71	1,61	0,00	3,87	4,69	5,41
60-80	0,15	0,16	0,01	0,47	0,52	0,00	3,77	3,76	4,51
80-100	0,10	0,17	0,02	5,59	0,70	0,10	4,09	3,80	4,52
Média Geral	0,21	0,23	0,05	11,98	11,57	0,31	5,57	5,56	6,42

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m).

3.5.3 Propriedades químicas do solo com um e dois anos de experimento

Os valores de pH (Tabela 8) e Ca^{2+} (Tabela 9), nas camadas de 0-5 e 5-10, na linha com espaçamento 0,9 m (não tráfegada), foram significativamente influenciados pelos níveis de palha de cana-de-açúcar depositados sobre a superfície do solo, apresentando comportamento quadrático. Na camada superficial, as menores médias de pH e Ca^{2+} , foram observadas no tratamento com retirada total da palha (5,20 e 0,90 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) e as maiores nos tratamentos com manutenção de 25% (5,99) e 50% (1,30 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) de palha, respectivamente. Para os valores de Ca^{2+} , esse comportamento se repetiu na camada de 5-10 cm. Contudo, para os de pH (5-10 cm) a menor média foi verificada no tratamento com 100% (5,28) de palha e a maior no tratamento com 50% (5,96).

Em relação aos valores de acidez potencial do solo (Tabela 8) da profundidade de 5 cm até 40 cm, na linha não tráfegada, os mesmos também foram influenciados pelos níveis de palha, apresentando comportamento quadrático. Os maiores valores de acidez potencial foram observados no tratamento com retirada total da palha principalmente em relação aos tratamentos com manutenção de maior quantidade de palha.

Os valores de K^+ (0,9 m espaçamento) (Tabela 9), avaliados nas camadas de 5-10 e 20-40 cm também foram alterados significativamente pelos níveis de palha depositados no solo, apresentando comportamento linear positivo e negativo, respectivamente. Na camada de 5-10 os maiores níveis de deposição de palha favoreceram o aumento de K^+ no solo, onde o tratamento de 100 % de palha apresentou média 26% superior ao tratamento com 0% de palha (73,08 mg Kg^{-1}). Porém, na camada de 20-40 cm, o aumento da quantidade de palha sobre o solo diminuiu os valores de K^+ . Ao avaliar os valores de P, na linha não tráfegada, observa-se efeito significativo dos níveis de palha em duas camadas (5-10 e 10-20 cm), apresentando comportamento semelhante entre si, onde verificou-se que a retirada total (0%) da palha diminuiu os valores de P solo principalmente em relação ao tratamento com 50% de palha sobre o solo.

Assim, nota-se que de maneira geral a remoção total da palha do solo, na linha não tráfegada, foi prejudicial aos valores de pH, Ca^{2+} , H+Al, K^+ e P, muitas das vezes com os resultados positivos variando entre as deposições de 50 e 100% de palha. A perda de qualidade do solo com a remoção da palha da cana também foi registrada por Satiro et al. (2017). Contudo, esses autores ressaltam que o grau de degradação varia com as condições do local e que os maiores impactos são observados na superfície do solo.

Por outro lado, nota-se que o comportamento dos resultados observados nas linhas não tráfegadas não se repetem nas linhas tráfegadas (mais compactadas). Ou seja, o efeito dos níveis de palha sobre os atributos químicos do solo também é dependente dos atributos físicos e do manejo da adubação do solo.

De maneira geral, nas linhas tráfegadas, os efeitos significativos dos níveis de palha sobre os atributos químicos do solo se restringiram as camadas mais subsuperficiais do solo (10-20 e 20-40 cm). Com os maiores teores de K^+ , na camada de 10-20 e 20-40 cm, no tratamento com 50% de palha em relação principalmente ao tratamento com 100% e 0%, respectivamente. A ausência de palha (0%) deixa de adicionar o K^+ via resíduos vegetais. Assim, o menor valor de K^+ observado no tratamento com 100% de palha, na camada 10-20 cm, não era esperado.

Ainda na linha tráfegada (1,5 m), os valores de H+Al (10-20), de Ca^{2+} e pH (20-40), foram significativamente influenciados pelos níveis de palha, com os menores valores observados no tratamento com 50% de palha especialmente em relação aos tratamentos com 100 e 0%, respectivamente.

Ao avaliar o efeito específico do tráfego de máquinas e implementos agrícolas, na fertilidade das linhas de cultivo da cana-de-açúcar (1,5 m e 0,9 m, trafegadas e não trafegadas, respectivamente), verificou-se que as linhas trafegadas apresentaram valores significativamente maiores de pH (5-10 cm), H+Al (20-40 cm) (Tabela 8) e de Ca²⁺ (0-5 e 5-10 cm) (Tabela 9) em comparação as linhas não trafegadas. De maneira geral, essa menor acidez do solo, nas linhas trafegadas possivelmente se deve a menor absorção de nutrientes nessa região e conseqüente menor acidificação em relação a linha não trafegada. Pois, a compactação do solo pode limitar o crescimento radicular, resultando na diminuição da absorção de água e nutrientes (Cabral et al., 2012; Miransari et al., 2009).

Além disso, a aplicação dos adubos na área de cultivo da cana-de-açúcar (em especial adubação das soqueiras) foi realizada na linha não trafegada, sendo o sulfato de amônio (100 kg de N ha⁻¹) utilizado como fonte de nitrogênio, o que também contribui no processo de acidificação do solo. Costa e colaboradores (2008), após 3 anos de uso de 300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio (fonte: sulfato de amônio), observaram uma redução de 5,6 para 4,6 no pH do solo.

Entretanto, os valores de K⁺ (5-10 e 20-40 cm) e de P (10-20 cm) foram significativamente maiores nas linhas não trafegadas (0,9 m) (87,71 e 99,44, 24,59 mg kg⁻¹, respectivamente) em relação às trafegadas (1,5 m) (22,98 e 47,18, 22,11 mg kg⁻¹). No caso específico do K⁺, a principal justificativa é o maior aporte desse elemento via adubação potássica (KCl – 180 kg ha⁻¹ de K₂O), a qual é realizada na linha com 0,9 m de espaçamento. Como o K⁺ apresenta elevada mobilidade no solo, possivelmente parte do adubo aplicado em superfície lixiviou até a camada mais profunda avaliada (20-40 cm). Esse movimento vertical de K⁺ no solo é favorecido em solos arenosos com baixa CTC e bem drenados (Raij, 2011), o que ocorre nesse caso.

Tabela 8. Valores médios de pH, acidez potencial, alumínio e sódio trocáveis, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar, nos dois espaçamentos (0,9 e 1,5 m) do cultivo duplo alternado, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

Níveis de palha (%)	0	25	50	100		0	25	50	100		0	25	50	100		0	25	50	100	
Camadas / Espaçamentos	pH				Média	H+Al				Média	Al ³⁺				Média	Na ⁺				Média
	(em água)										(cmol _c kg ⁻¹)									
0-5 cm	5,37	5,68	5,69	5,77		1,43	1,27	1,45	1,36		0,01	0,01	0,01	0,00		0,03	0,03	0,03	0,03	
0,9 m	5,20	5,99	5,75	5,78	5,68	1,59	1,22	1,51	1,29	1,40	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
1,5 m	5,55	5,37	5,64	5,76	5,58	1,27	1,31	1,39	1,43	1,35	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
5-10 cm	5,71	5,89	5,93	5,58		1,58	1,51	1,21	1,59		0,01	0,03	0,01	0,01		0,03	0,03	0,03	0,03	
0,9 m	5,60	5,81	5,96	5,28	5,66 b	1,81	1,51	1,28	1,61	1,55	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1,5 m	5,81	5,97	5,89	5,88	5,89 a	1,35	1,52	1,15	1,57	1,40	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
10-20 cm	5,72	5,68	5,69	5,61		1,55	1,40	1,17	1,38		0,01	0,01	0,01	0,01		0,03	0,03	0,03	0,03	
0,9 m	5,72	5,54	5,48	5,63	5,59	1,61	1,21	1,23	1,07	1,28 b	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1,5 m	5,72	5,83	5,90	5,60	5,76	1,50	1,59	1,12	1,70	1,48 a	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
20-40 cm	5,79	5,90	5,54	5,70		1,42	1,33	1,56	1,26		0,01	0,00	0,01	0,01		0,03	0,03	0,03	0,03	
0,9 m	5,66	5,98	5,75	5,63	5,75	1,24	1,31	1,67	1,28	1,38	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
1,5 m	5,92	5,81	5,33	5,78	5,71	1,59	1,36	1,45	1,24	1,41	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Teste de Regressão	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%
			(%)				(%)				(%)				(%)				(%)	
0-5 cm	*	***	92,02	4,03	ns	ns	ns	11,91	ns	ns	ns	6,18	**	ns	98,22	14,81				
0,9 m	***	ns	65,72		ns	ns	ns		ns	ns	ns		**	ns	73,40					
1,5 m	ns	*	55,98		ns	ns	ns		**	**	94,71		ns	**	68,57					
5-10 cm	***	ns	99,98	3,29	***	ns	73,19	15,27	ns	ns	ns	10,59	ns	ns	ns	20,99				
0,9 m	***	ns	97,95		***	ns	97,99		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
1,5 m	ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
10-20 cm	ns	ns	ns	6,46	***	ns	90,23	12,22	ns	ns	ns	8,80	ns	ns	ns	20,62				
0,9 m	ns	ns	ns		**	***	87,65		ns	ns	ns		ns	**	61,01					
1,5 m	ns	ns	ns		***	ns	50,15		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
20-40 cm	ns	ns	ns	5,85	***	ns	48,33	6,85	ns	ns	ns	8,09	ns	ns	ns	26,13				
0,9 m	ns	ns	ns		***	ns	70,49		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
1,5 m	***	ns	71,30		ns	***	72,77		ns	ns	ns		ns	ns	ns					

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m). RQ: regressão quadrática; RL: regressão linear. *, ** e *** Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo (p > 0,10).

Tabela 9. Valores médios de cálcio, magnésio, e potássio trocáveis, e fósforo disponível, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar, nos dois espaçamentos (0,9 e 1,5 m) de cultivo duplo alternado, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

Níveis de palha (%)	0	25	50	100		0	25	50	100		0	25	50	100		0	25	50	100	
Camadas / Espaçamentos	Ca ²⁺				Média	Mg ²⁺				Média	K ⁺				Média	P disponível				Média
	-----				(cmol _c kg ⁻¹)	-----					-----				(mg kg ⁻¹)	-----				
0-5 cm	1,16	1,28	1,36	1,08		0,84	0,78	0,88	0,93		49,09	24,15	62,99	43,84		22,66	21,19	23,00	23,53	
0,9 m	0,90	1,28	1,30	0,95	1,11 b	0,88	0,75	1,18	0,90	0,93	62,99	21,55	70,57	65,16	55,07	22,42	22,84	21,69	24,02	22,74
1,5 m	1,43	1,28	1,43	1,20	1,33 a	0,80	0,80	0,58	0,95	0,78	35,19	26,74	55,42	22,52	34,97	22,89	19,54	24,31	23,03	22,44
5-10 cm	1,09	1,48	1,40	1,06		0,95	0,81	0,80	0,84		44,77	56,78	49,91	61,91		22,49	23,29	25,41	22,18	
0,9 m	0,75	1,50	1,50	0,85	1,15 b	0,95	0,83	0,78	0,73	0,82	73,08	81,52	81,52	98,71	83,71a	21,28	26,00	27,34	22,32	24,24
1,5 m	1,43	1,45	1,30	1,28	1,36 a	0,95	0,80	0,83	0,95	0,88	16,46	32,05	18,30	25,12	22,98b	23,71	20,57	23,48	22,04	22,45
10-20 cm	1,38	1,25	1,56	1,30		0,75	0,88	0,99	0,91		99,92	81,03	88,39	61,98		22,93	21,72	27,17	21,58	
0,9 m	1,30	1,30	1,68	1,30	1,39	0,88	1,00	0,90	1,00	0,94	105,77	98,41	82,60	80,44	91,80	23,05	22,06	31,70	21,56	24,59a
1,5 m	1,45	1,20	1,45	1,30	1,35	0,63	0,75	1,08	0,83	0,82	94,08	63,66	94,19	43,51	73,86	22,82	21,39	22,63	21,59	22,11b
20-40 cm	1,20	1,01	1,08	1,33		0,96	0,74	0,65	0,64		67,83	86,88	89,42	49,10		23,80	24,50	26,71	23,32	
0,9 m	1,18	1,03	1,45	1,40	1,26	1,10	0,75	0,65	0,58	0,77	123,63	114,21	85,74	74,16	99,44a	24,81	24,35	26,42	21,29	24,22
1,5 m	1,23	1,00	0,70	1,27	1,05	0,83	0,73	0,65	0,70	0,73	12,02	59,54	93,10	24,03	47,18b	22,78	24,65	26,99	25,34	24,94
Teste de Regressão	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%	RQ	RL	R ²	CV%				
			(%)				(%)				(%)				(%)					
0-5 cm	***	ns	97,14	14,61	ns	ns	ns	30,52	ns	ns	ns	75,17	ns	ns	ns	7,28				
0,9 m	***	ns	97,11		ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
1,5 m	ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
5-10 cm	***	ns	90,27	16,38	ns	ns	ns	25,06	ns	**	63,76	25,54	**	ns	81,16	12,50				
0,9 m	***	ns	95,30		ns	ns	ns		ns	**	93,92		***	ns	99,78					
1,5 m	ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns					
10-20 cm	ns	ns	ns	24,60	ns	ns	ns	28,76	ns	**	82,42	34,80	***	ns	ns	11,52				
0,9 m	ns	ns	ns		ns	ns	ns		ns	ns	ns		***	ns	50,06					
1,5 m	ns	ns	ns		*	ns	81,06		ns	**	51,16		ns	ns	ns					
20-40 cm	ns	ns	ns	36,36	ns	**	69,05	39,30	***	ns	99,99	21,95	**	ns	79,59	12,53				
0,9 m	ns	ns	ns		ns	**	75,16		ns	***	90,67		ns	ns	ns					
1,5 m	**	ns	91,7		ns	ns	ns		ns	***	98,0		ns	ns	ns					

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m). RQ: regressão quadrática; RL: regressão linear. *, ** e *** Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo (p > 0,10).

Com relação aos resultados das análises químicas há 2 anos após a deposição anual de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, os valores de Ca^{2+} , Mg^{2+} (Figura 8), H+Al , Na^+ (Figura 10), K^+ e P (Figura 11), em relação a área de amostragem (linha não trafegada ou linha trafegada) apresentaram comportamento semelhante entre si. Porém, os valores de Al^{3+} e pH do solo (Figura 9), de maneira geral em todas as camadas avaliadas, foram levemente mais elevados na linha trafegada e menores na linha não trafegada.

Os níveis de palha aplicados no solo disponibilizam quantidades variáveis de nutrientes (Fortes et al., 2012), bem como de manutenção de água (Anjos et al., 2017), e consequentemente na diversidade da fauna no solo (Abreu et al., 2014; Benazzi et al., 2014). Acredita-se que essa variação influencia ainda na absorção de água e nutrientes pelas plantas, consequentemente na produtividade de colmos (Aquino et al., 2018; Aquino et al., 2017). Assim, observa-se que a maior acidificação do solo ocorreu principalmente na linha trafegada, onde houve diminuição de pH e aumento teores de Al^{3+} principalmente nas camadas 30-40 e de 60-100 cm. Os menores valores de pH e maiores valores de Al^{3+} , respectivamente, ocorreram nos tratamentos que obtiveram maiores produtividades de colmos (50 e 25 %, Figura 9), possivelmente devido a maior extração de bases.

Para os valores de Ca^{2+} na camada de 80-100 e 10-20 cm, na linha não trafegada e trafegada, respectivamente, observou-se efeito significativo das doses de palha. Onde os tratamentos com 25 (0,43 e 0,9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente) e 50 % (0,33 e 1,10 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente) de palha apresentaram os menores valores principalmente em relação ao tratamento com 0% (0,73 e 1,25 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). Lange et al. (2008), explicam que com o aumento da produtividade da cultura graças a maior disponibilidade de N (Figura 13) ocorre redução da disponibilidade de Ca^{2+} , e que a presença de íons amônio também diminui a adsorção do Ca^{2+} , sendo a CTC do solo ocupada preferencialmente por Al^{3+} .

Entretanto, esse comportamento não ocorreu com os valores de Mg^{2+} . Esses foram influenciados pelos níveis de palha, em ambos espaçamentos amostrados. Sendo da linha não trafegada os efeitos significativos observados nas camadas de 10-20 e 30-40 cm com maiores médias nos tratamentos com 25% de palha e os menores no tratamento com 100% de palha. Por outro lado, na linha trafegada, os efeitos significativos dos níveis de palha sobre os teores de Mg^{2+} foram verificados em um maior número de camadas (0-5, 30-40, 40-60 e 60-80 cm). Na camada superficial os maiores valores foram observados nos tratamentos com 50 e 25% (média de 0,96 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de palha em relação aos com 100 e 0% (média de 0,66 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), comportamento semelhante observou-se na camada de 40-60 cm. Entretanto nas camadas de 30-40 e 60-80 cm, as maiores médias foram observadas no tratamento com remoção total da palha principalmente em relação ao tratamento com manutenção de 100% de palha.

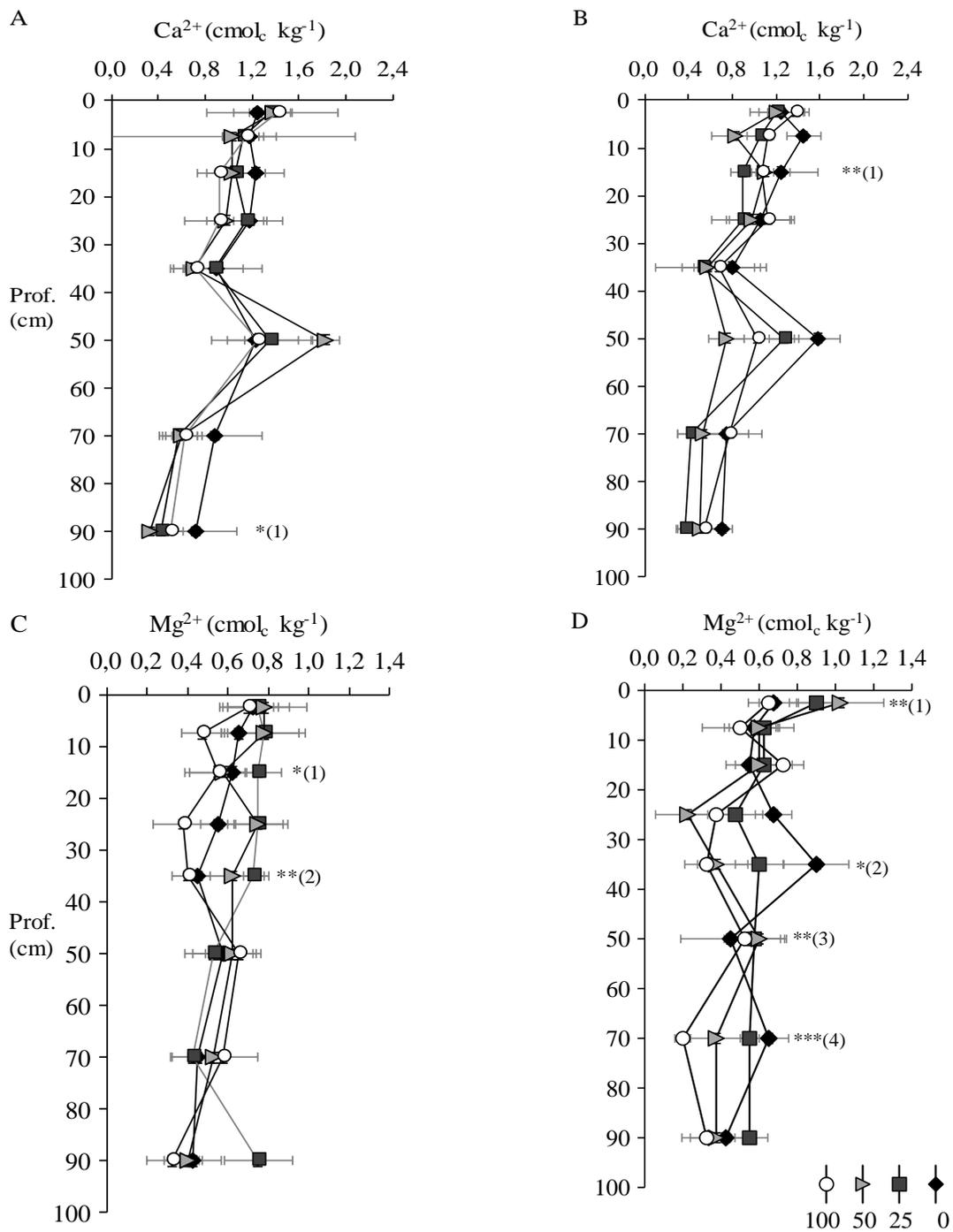


Figura 8. Valores médios de cálcio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e magnésio (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = 0,000119x^2 - 0,014077x + 0,718864$, $r^2 = 0,99$. B: ⁽¹⁾ $y = 0,000181x^2 - 0,021423x + 1,456136$, $r^2 = 0,99$. C: ⁽¹⁾ $y = -0,000086x^2 + 0,006859x + 0,652045$, $r^2 = 0,999$; ⁽²⁾ $y = 0,000119x^2 - 0,010077x + 0,556136$, $r^2 = 0,99$. D: ⁽¹⁾ $y = -0,000139x^2 + 0,013777x + 0,666136$, $r^2 = 0,99$; ⁽²⁾ $y = -0,000105x^2 + 0,013836x + 0,696818$, $r^2 = 0,946$; ⁽³⁾ $y = -0,005486x + 0,79$, $r^2 = 0,80$; ⁽⁴⁾ $y = -0,0046x + 0,645$, $r^2 = 0,98$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 probabilidade teste t, respectivamente.

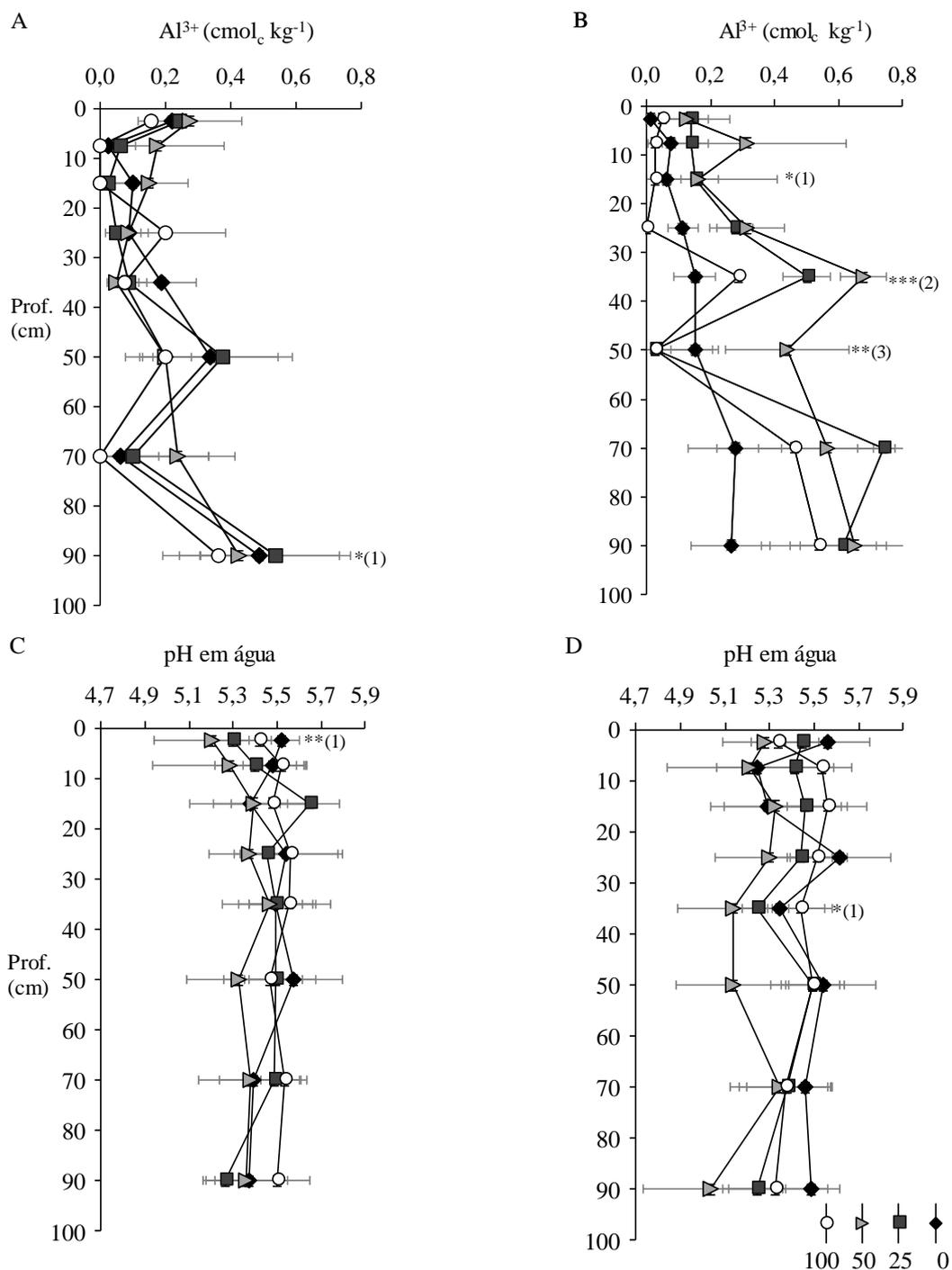


Figura 9. Valores médios de alumínio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e pH em água (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = -0,000162x^2 + 0,015807x + 0,459659$, $r^2 = 0,98$. B: ⁽¹⁾ $y = -0,000087x^2 + 0,008582x + 0,048409$, $r^2 = 0,817$; ⁽²⁾ $y = -0,000102x^2 + 0,009107x + 0,112159$, $r^2 = 1,0$; ⁽³⁾ $y = -0,000179x^2 + 0,019316x + 0,144205$, $r^2 = 0,99$. C: ⁽¹⁾ $y = 0,000105x^2 - 0,011507x + 5,517364$, $r^2 = 1,0$. D: ⁽¹⁾ $y = 0,000100x^2 - 0,011111x + 5,626$, $r^2 = 0,97$, ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

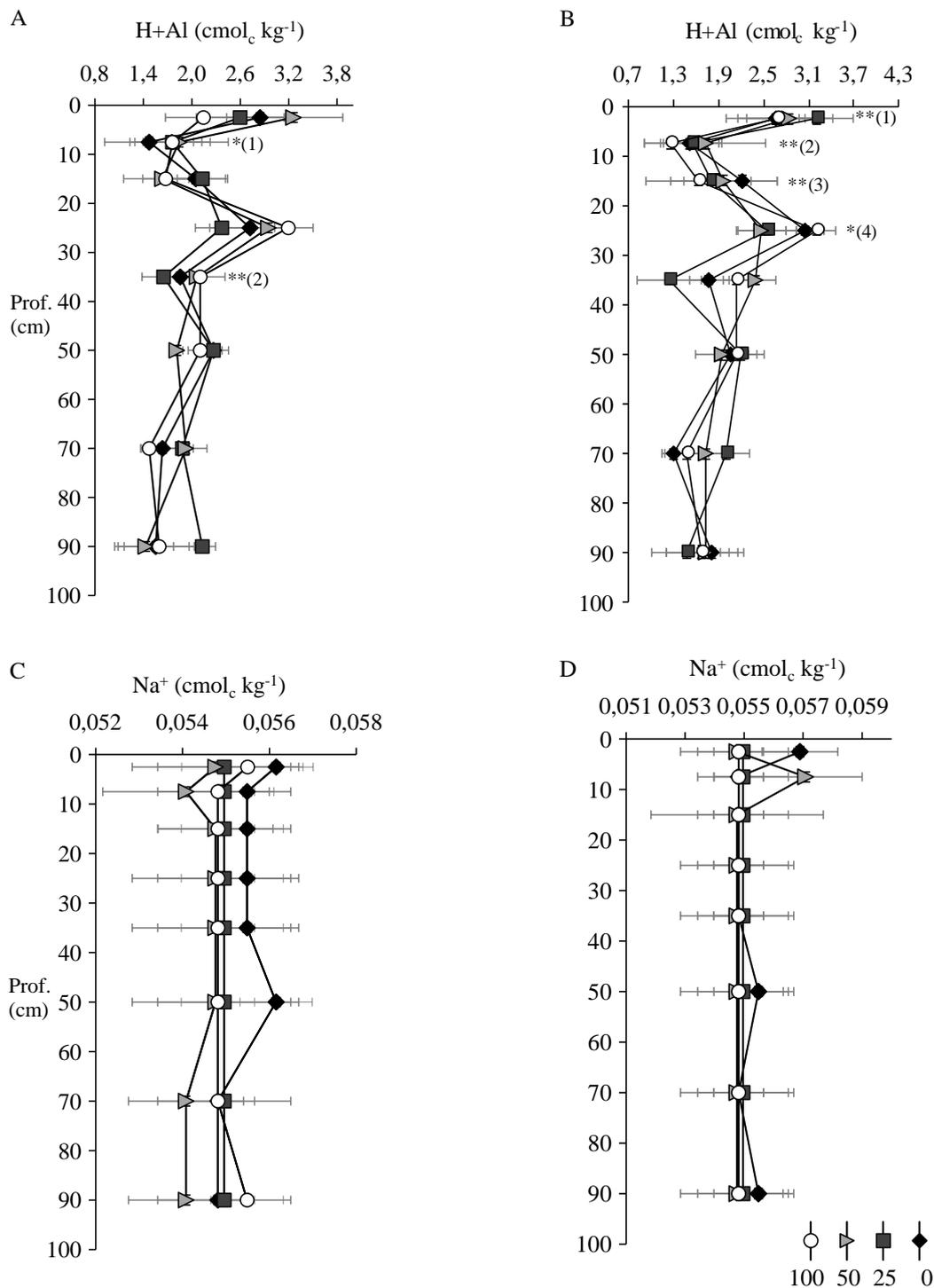


Figura 10. Valores médios de acidez potencial (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e sódio (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = -0,000182x^2 + 0,01495x + 1,63$, $r^2 = 0,93$; ⁽²⁾ $y = 0,000207x^2 - 0,022886x + 2,356818$, $r^2 = 0,99$. B: ⁽¹⁾ $y = -0,000268x^2 + 0,027817x + 1,500159$, $r^2 = 0,94$; ⁽²⁾ $y = -0,000292x^2 + 0,02946x + 1,498841$, $r^2 = 0,83$; ⁽³⁾ $y = -0,000249x^2 + 0,028216x + 1,584682$, $r^2 = 0,99$; ⁽⁴⁾ $y = -0,000198x^2 + 0,017387x + 1,813659$, $r^2 = 0,64$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Os efeitos significativos dos níveis de palha sobre os teores de K^+ no solo se restringiram apenas à camada de 60-80 cm na linha não tráfegada e às camadas de 30-40 e 80-100 cm na linha tráfegada. Na camada de 30-40 cm as maiores médias foram verificadas no tratamento com 100% de palha e a menor no com 50%. Contudo, nas camadas de 60-80 e 80-100 cm, as maiores médias foram observadas no tratamento com 0% de palha em relação ao com 100% de palha.

Assim, acredita-se que o maior aporte de K^+ via maior deposição de palha (100%) ocorre principalmente até os primeiros 40 cm de profundidade do solo. Os maiores valores encontrados a partir dessa profundidade, possivelmente ocorreu graças a menor capacidade de retenção do mesmo devido a textura arenosa do solo e aos baixos teores de matéria orgânica do solo, conseqüentemente o que favoreceu a percolação desse nutriente até camadas mais profundas.

Satiro et al. (2017), acreditam que maior remoção de palha da cana-de-açúcar ocasiona maiores alterações nos níveis de K no solo do que os de Ca ou Mg, uma vez que o K está presente em maior quantidade na palha (Fortes et al., 2012) sendo prontamente liberado dos resíduos para o solo. No entanto, os maiores teores de Ca e Mg, nas camadas mais superficiais, encontrados por Satiro et al. (2017), podem ser explicados por fatores que controlam a dinâmica desses nutrientes associados às características das áreas em estudo. A maior valência e menor raio hidratado do Ca e Mg induzem maior atração pelas cargas negativas do solo, em relação ao K, aumentando a adsorção e acúmulo desses elementos nas camadas superficiais do solo.

Os teores de P assimilável do solo também foram influenciados significativamente pelos níveis de palha depositados sobre o solo, na linha não tráfegada (0,9 m) nas camadas de 10-20, 20-30 e 80-100 cm, e na linha tráfegada (1,5 m) nas camadas de 20-30, 40-60 e 80-100 cm. Na camada mais profunda avaliada, os resultados em ambas as linhas de cultivo não merecem destaque, pois são valores muito baixos ($\leq 2,30 \text{ mg kg}^{-1}$). Já na linha não tráfegada, nas camadas de 10-20 e 20-40 cm observou-se maiores valores nos tratamentos com 25 e 50%, respectivamente, em relação ao tratamento com deposição de 100% de palha para ambas camadas. Contudo, na linha tráfegada o tratamento com 50% de manutenção de palha apresentou os menores valores nas camadas 10-20 e 40-60 cm, especialmente em relação aos tratamentos com 0 e 100% de deposição de palha, respectivamente.

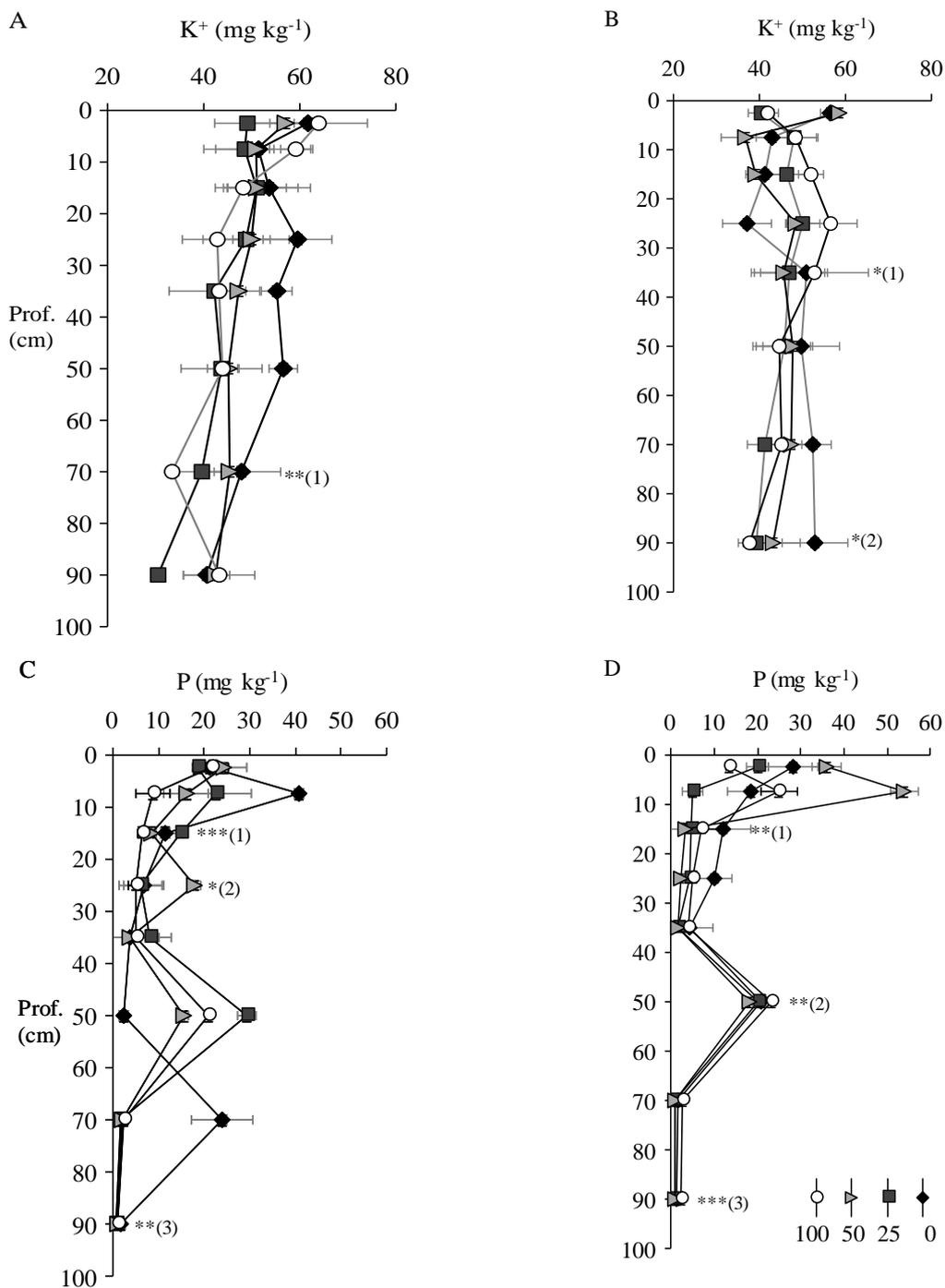


Figura 11. Valores médios de potássio (A e B, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), e fósforo assimilável (C e D, nos espaçamentos de 0,9 e 1,5m, respectivamente), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%) da cana-de-açúcar sobre Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = -0,123289x + 46,9545$, $r^2 = 0,67$; B: ⁽¹⁾ $y = 0,168683x + 40,6495$, $r^2 = 0,79$; ⁽²⁾ $y = -0,120854x + 48,548$, $r^2 = 0,57$. C: ⁽¹⁾ $y = -0,29502x + 34,899$, $r^2 = 0,845$; ⁽²⁾ $y = -0,066931x + 13,3295$, $r^2 = 0,60$; ⁽³⁾ $y = 0,000254x^2 - 0,030215x + 1,599727$, $r^2 = 0,57$. D: ⁽¹⁾ $y = 0,002713x^2 - 0,314656x + 11,553318$, $r^2 = 0,97$; ⁽²⁾ $y = 0,001141x^2 - 0,114003x + 4,049636$, $r^2 = 0,95$; ⁽³⁾ $y = 0,000362x^2 - 0,025738x + 1,262886$, $r^2 = 0,99$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 probabilidade pelo teste t, respectivamente.

3.5.4 Carbono e nitrogênio no solo

O efeito positivo da manutenção da palha da cana-de-açúcar sobre os teores de carbono do solo tem sido apontado em muitos estudos (Thorburn et al., 2012; Pinheiro et al., 2010, Galdos et al., 2009). Contudo, esses estudos observaram o efeito da manutenção de toda a palha resultante da colheita em comparação ao sistema com queima da palha. E os estudos mais recentes, vêm investigando a possibilidade de remover em parte ou totalidade a palha do campo para cogeração de energia ou produção de álcool de segunda geração. Bem como o reflexo do manejo da quantidade de palha sobre a qualidade do solo, produtividade e longevidade da cultura.

Nesse estudo, observa-se que um ano após a deposição de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, os valores de C (Figura 12) foram significativamente influenciados pelos níveis de palha na camada de 0-5 m. Nessa camada, na linha não trafegada (Figura 12 A), a deposição de 100% de palha resultou em valores de C ($13,8 \text{ g kg}^{-1}$) 22% maiores do que os observados nos tratamentos com 25 e 0% ($10,76 \text{ g kg}^{-1}$) de deposição. O que corrobora com o estudo de Satiro et al. (2017), estes verificaram que a remoção de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar do solo (0, 25, 50, 75 e 100%), em experimento com 2 anos de duração, em locais com solos distintos do estado de São Paulo, altera significativamente os estoques de C em Latossolo Vermelho e nos primeiros 5 cm de profundidade. Onde, com a não remoção de palha o estoque de C ($11,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) foi 20% maior do que quando a palha foi completamente removida ($9,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Entretanto na linha trafegada (Figura 12B), os efeitos significativos foram verificados não só na camada de 0-5 cm mas, também na camada de 10-20 cm, com os maiores valores no tratamento com manutenção de 50 % de palha principalmente em comparação ao tratamento com remoção total.

A entrada de C no solo via sistema radicular da cana-de-açúcar encontrada por Carvalho et al. (2017) foi de $1,88 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Mas, a principal entrada é decorrente da palhada depositada sobre o solo ($5,44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Carvalho et al., 2017; Wood et al., 1991). Assim, a remoção da palha do campo prejudicou a entrada de C no solo, em especial nos primeiros 20 cm de profundidade (Figura 12).

O maior teor de C no tratamento com deposição de 50% de palha em relação ao tratamento com 100% de palha, nos primeiros 20 cm de profundidade do solo, na linha trafegada, possivelmente foi influenciado pelos atributos físicos do solo. Além disso, o curto prazo de instalação do experimento possivelmente também influenciou nesse resultado.

O aporte de C no solo depende ainda das condições edafoclimáticas de cada área (Satiro et al., 2017; Torburn et al., 2012, Galdos et al., 2009), do preparo do solo aplicado (Carvalho et al., 2017; Lopes et al., 2017). E nas condições desse estudo, a deposição de maiores quantidades de palha ($7,8$ e $14,15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) favoreceram o aumento de carbono no solo, principalmente na linha trafegada (1,5 m).

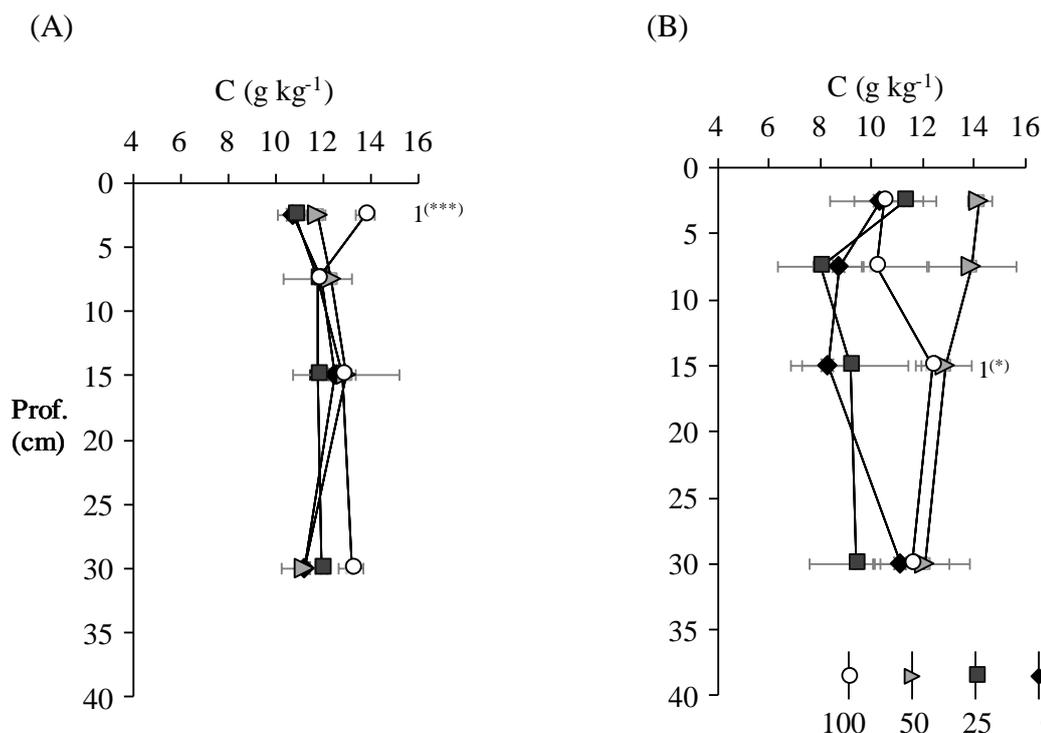


Figura 12. Teores de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) em diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado - PR

linha com 0,9 m (linha não trafegada) e B= linha com 1,5 m (linha trafegada). **A:** $^{(1)}y = 0,03266x + 10,35$, $r^2 = 0,95$. **B:** $^{(1)}y = -0,001251x^2 + 0,1324x + 9,893$, $r^2 = 0,78$; $^{(2)}y = 0,0442x + 8,75$, $r^2 = 0,67$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs. Em todas as camadas avaliadas não houve diferença significativa entre os diferentes espaçamentos de linha (0,9 x 1,5 m).

Os teores de N no solo (Figura 13) da linha trafegada (1,5 m), um ano após a deposição de diferentes níveis de palha, apresentaram comportamento semelhante ao observado para os teores de C. Embora tenha sido observado influência significativa dos níveis de palha apenas na camada de 10-20 cm, nota-se que os valores das camadas superiores a essa também apresentaram maiores teores de N com as maiores deposições de palha (50 e 100%) em relação às menores taxas de deposição (0 e 25%).

Esse resultado indica que a palhada contribui na disponibilidade de N via mineralização da mesma (Menandro et al., 2017; Fortes et al., 2012). A contribuição de N via palha da cana-de-açúcar pode chegar até 23% após a colheita de 3 safras (Fortes et al., 2011). Basanta et al. (2003) estudando a ciclagem de N da palhada de cana-de-açúcar em dois tipos de manejo, com queima e sem queima, verificaram que, em área sem a queima $105 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N foram reciclados contra $31 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N em área com queima, demonstrando que em áreas com queima da palhada $83,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N deixam de ser incorporados ao sistema.

O aumento médio em 31% do valor de N na linha não trafegada ($1,6 \text{ g kg}^{-1}$) em relação a trafegada ($1,1 \text{ g kg}^{-1}$), possivelmente ocorreu devido a adubação nitrogenada (fonte: sulfato de amônio) realizada próximo às linhas de cultivo no espaçamento de 0,9 m (não trafegada). Contudo, principalmente na camada de 0-5 cm da linha não trafegada, as maiores deposições de palha (100 e 50%) apresentaram as menores médias de N ($1,45$ e $1,52 \text{ g kg}^{-1}$,

respectivamente) em relação aos níveis de (0 e 25%, 1,60 e 1,67 g kg⁻¹, respectivamente). Logo, acredita-se que nos maiores níveis de manutenção de palha sobre o solo houve imobilização do N aplicado por microrganismos, já que a relação C/N da palhada é muito alta (Vitti et al., 2011).

No processo de decomposição dos resíduos vegetais, a relação C/N do material é um dos principais fatores que regulam a mineralização e/ou imobilização do nitrogênio pelos microrganismos do solo (Basanta, 2004). De maneira geral, a relação C/N crítica é de 30, onde resíduos vegetais com relação C/N maior que esse valor tende a imobilizar o N disponível. Por outro lado, resíduos vegetais com valor menor que o crítico tende a mineralizar o N. Como a palhada da cana-de-açúcar apresenta relação C/N superior a 70 (Robertson & Thorburn, 2007), nas áreas sem queima com deposição de 100% de palha, durante o processo de decomposição predomina a imobilização do nitrogênio em detrimento da mineralização, diminuindo a sua disponibilidade para a cultura.

A aplicação de maiores doses de N, em sistemas de produção sem queima da palhada (colheita mecânica), é uma alternativa para diminuir a relação C/N da palhada. Estudos comprovam que a aplicação do fertilizante nitrogenado aumenta a taxa de decomposição da palhada (Potrich et al., 2014; Vitti et al., 2008).

A partir de resultados de estudos prévios da recuperação do N proveniente da palhada da cana-de-açúcar em áreas sem queima (colheita mecânica), em diferentes ciclos da cultura, e de dados originais obtidos em dois experimentos de campo, conduzidos em Jaboticabal-SP, que avaliaram a ciclagem de nutrientes via decomposição da palhada da cana-de-açúcar, Trivelin et al. (2013), observaram que a manutenção da palhada sobre o solo a longo prazo vai aumentar a recuperação do N derivado da palhada atingindo o equilíbrio após 40 anos, com uma oferta de 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Além disso, constataram a importância de manter palhada no sistema para a garantia da manutenção da fertilidade do solo, o que a longo prazo também pode diminuir as despesas com fertilizantes sintéticos.

Ainda na linha não trafegada (Figura 13 A), os maiores valores de N foram observados nos tratamentos com 50 (10-20 cm) e 25% de palha (20-40 cm) e os menores nos tratamentos com 100 e 0% de palha, respectivamente. O que indica que possivelmente a imobilização do N por microrganismos está ocorrendo de forma intensa no tratamento com manutenção de 100% de palha, até os 40 cm de profundidade do solo.

Os resultados encontrados por Satiro et al. (2017) não estão de acordo com os deste estudo. Pois, esses autores não observaram efeitos significativos dos níveis de remoção da palha sobre os teores de N de um Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo, após dois anos de experimento.

Os valores de relação C:N do solo variaram de 6,69 à 9,56 na linha não trafegada e de 7,09 à 12,74 na linha trafegada. Na linha não trafegada, a manutenção de toda a palha sobre o solo resultou em relação C:N de 9,56, ou seja, 33 e 29% mais elevada que as observadas com a deposição de 25 (6,43) e 0% (6,75) de palha, respectivamente (Figura 14).

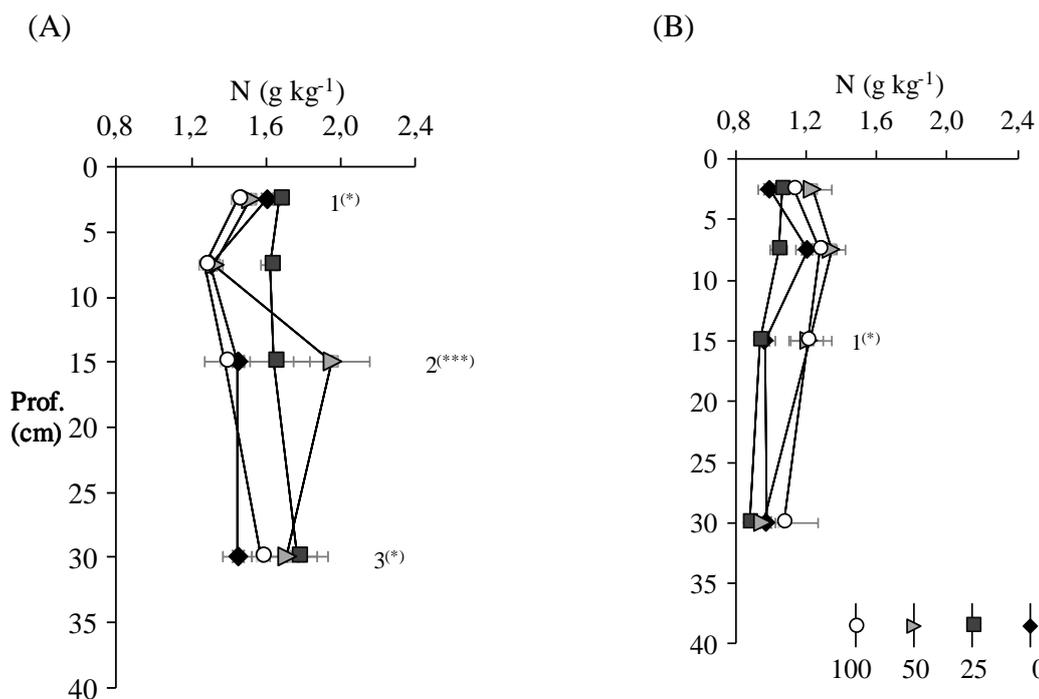


Figura 13. Teores de nitrogênio total do solo (g kg^{-1}) diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado - PR

A= linha com 0,9 m (linha não trafegada) e B= linha com 1,5 m (linha trafegada). **A:** ⁽¹⁾ $y = -0,001934x + 1,644$, $r^2 = 0,73$; ⁽²⁾ $y = -0,000186x^2 + 0,018445x + 1,4052$, $r^2 = 0,89$; ⁽³⁾ $y = -0,000101x^2 + 0,010915x + 1,47825$, $r^2 = 0,82$. **B:** ⁽¹⁾ $y = 0,00282x + 0,9605$, $r^2 = 0,64$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs. Em todas as camadas avaliadas houve diferença ($p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey) significativa entre os diferentes espaçamentos, onde o espaçamento 0,9 m apresentou maiores valores em relação ao espaçamento de 1,5 m.

Os efeitos significativos dos níveis de palha sobre a relação C:N do solo também foram observados na linha trafegada (1,5 m), nas duas camadas mais superficiais (Figura 14 B). A deposição de 50% de palha resultou em valores mais elevados de relação C:N do solo principalmente em relação aos tratamentos com 100% (9,0) e 0% de palha (7,09), para as camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. A maior relação C:N do solo, sugere menor mineralização de matéria orgânica e maior aporte de resíduos vegetais ao solo, isto é, matéria orgânica bruta sendo adicionada na camada superficial (0-5 cm) no espaçamento 0,9 m demonstra bem isso, com maiores relações C/N no tratamento com maior aporte de palhada (100%) decrescendo a relação C/N, conforme reduz a percentagem de palha na superfície do solo (0%). Esse mesmo comportamento é observado em sistema plantio direto com a constante deposição de palhada na superfície do solo, mostrando um menor grau de humificação da MOS em comparação ao sistema convencional.

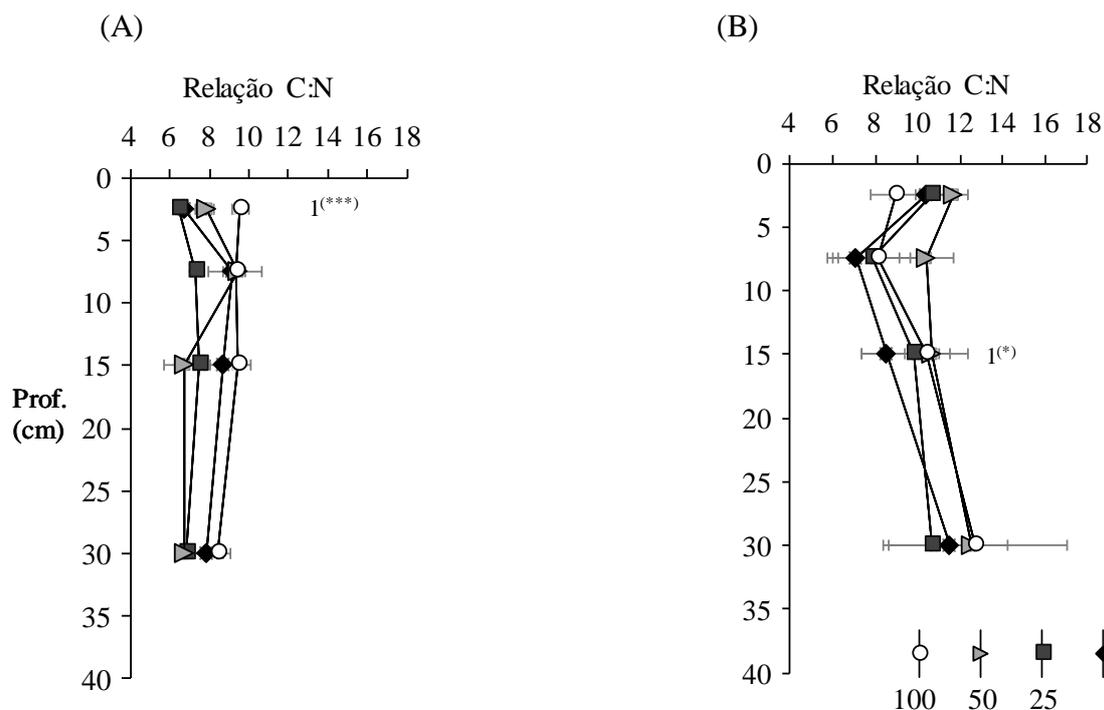


Figura 14. Relação carbono/nitrogênio (C:N) diferentes camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

A= linha com 0,9 m (linha não trafegada) e B= linha com 1,5 m (linha trafegada). **A:** $(1) y = 0,0312x + 6,28, r^2 = 0,89$. **B:** $(1) y = -0,000671x^2 + 0,055824x + 10,1898, r^2 = 0,885$; $(2) y = -0,000889x^2 + 0,104307x + 6,74, r^2 = 0,76$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs.: nas camadas 05, 10-20 e 20-40 cm, houve diferença significativa ($p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey) entre os diferentes espaçamentos, onde o espaçamento 1,5 m apresentou maiores valores em relação ao espaçamento de 0,9 m.

Os teores de C orgânico do solo (Figura 15), avaliados 2 anos após a deposição de diferentes níveis de palha não seguiram o comportamento observado no primeiro ano. Na linha não trafegada (0,9 m) efeitos significativos foram verificados nas camadas 5-10, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm e na linha trafegada (1,5 m) nas camadas 0-5, 40-60 e 60-80 cm.

Nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, linha com 1,5 e 0,9 m de espaçamento, respectivamente o tratamento com 25% (11,9 e 11,71 g kg⁻¹, respectivamente) de deposição de palha apresentou os maiores valores de C e o tratamento com 0% (7,45 e 6,98 g kg⁻¹, respectivamente) os menores. Reforçando que a remoção total da palha da cana-de-açúcar do solo diminui os teores de C do mesmo (Satiro et al., 2017; Carvalho et al., 2017; Thorburn et al., 2012; Galdos et al., 2009).

Nas camadas de 30-40 e 40-60 cm a deposição de 100% de palha apresentou os menores valores em relação aos demais níveis que apresentaram valores semelhantes entre si. Esse mesmo comportamento foi verificado nas camadas de 40-60 e 60-80 cm na linha trafegada.

E nas duas últimas camadas avaliadas (60-80 e 80-100 cm), da linha não trafegada, os menores valores também foram verificados no tratamento sem remoção de palha, mas os maiores foram observados no tratamento com remoção total da palha.

Esses menores teores de C observados a partir de 30 cm de profundidade, no tratamento com manutenção de 100%, possivelmente estão ligados ao desenvolvimento radicular mais restrito desse tratamento. Visto que, o tratamento com 100% de manutenção de palha possui

maior retenção de água em relação aos demais e além disso foi o que apresentou maiores impedimentos físicos ao crescimento radicular em relação aos demais (Figuras 20 e 21). O que diminui a agregação desse solo, conseqüentemente a estabilização do C recentemente depositado.

Os maiores efeitos do manejo da palhada da cana-de-açúcar sobre os teores de C no solo geralmente se restringem as camadas mais superficiais do solo. Pinheiro et al. (2010), em experimento com 14 anos de duração, com cana queimada e cana crua verificaram maior contribuição do C orgânico do solo advindo da cana-de-açúcar em detrimento do C oriundo da mata, até os primeiros 30 cm de profundidade do solo, com os maiores valores em sistema com manutenção total da palha. Contudo, mesmo em camadas mais profundas (80-100 cm), em ambos os sistemas, observou-se contribuição de C advindo da cana-de-açúcar.

Assim, acredita-se que o aumento de C no solo em camadas mais profundas está ligado a deposição via sistema radicular da cana-de-açúcar (Carvalho et al., 2017). De acordo com a revisão de Carvalho e colaboradores, o sistema radicular da cana-de-açúcar incorpora cerca de 3 vezes menos C ($1,88 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) do que a palhada. Contudo, esse C apresenta maior potencial de estabilização no solo, pois as raízes são ricas em compostos fenólicos e lignáceos, e promovem a agregação do solo aumentando a proteção física do C adicionado (Oades, 1995).

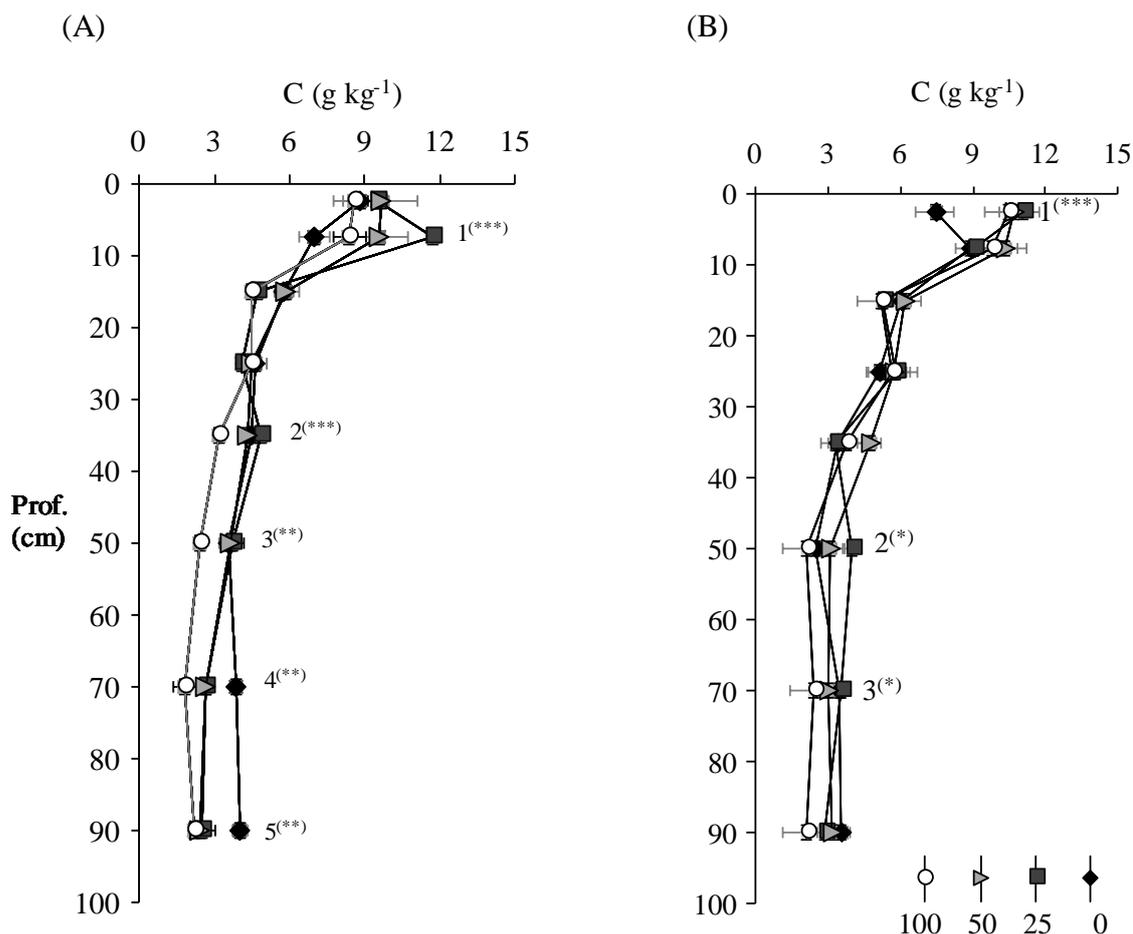


Figura 15. Teores de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados dois anos (2^a soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

A= linha com 0,9 m (linha não trafegada) e B= linha com 1,5 m (linha trafegada). **A:** ⁽¹⁾ $y = -0,00119x^2 + 0,1247x + 7,625$, $r^2 = 0,58$; ⁽²⁾ $y = -0,01457x + 4,844$, $r^2 = 0,78$; ⁽³⁾ $y = -0,01258x + 3,879$, $r^2 = 0,74$; ⁽⁴⁾ $y = 0,000336x^2 - 0,04866x + 3,762$, $r^2 = 0,88$; ⁽⁵⁾ $y = -0,01385x + 3,5495$, $r^2 = 0,89$. **B:** ⁽¹⁾ $y = -0,000926x^2 + 0,1182x + 7,7947$, $r^2 = 0,83$; ⁽²⁾ $y = -0,000307x^2 + 0,0278x + 2,8036$, $r^2 = 0,94$; ⁽³⁾ $y = -0,007914x + 3,4375$, $r^2 = 0,73$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs. Em todas as camadas avaliadas não houve diferença significativa entre os diferentes espaçamentos de linha (0,9 x 1,5 m).

Em relação aos teores de N no solo após aproximadamente 2 anos de avaliação observa-se que apresentou comportamento contrário ao observado no primeiro ano. Onde os maiores níveis de deposição de palha (100 e 50%) favoreceram o maior conteúdo de nitrogênio em ambas as linhas de amostragem (0,9 e 1,5 m) em comparação principalmente a tratamento com remoção total da palha. Esse comportamento foi observado praticamente até os 40 cm de profundidade do solo (Figura 16).

Acredita-se que o N imobilizado na cana-planta e primeira soca tenha sido mobilizado na segunda soca, aumentando os teores de N do solo. Além disso, acredita-se que os maiores níveis de palha também tenham contribuído na disponibilidade de N graças a mineralização desse material (Trivelin et al., 2013; Robertson e Thorburn, 2007).

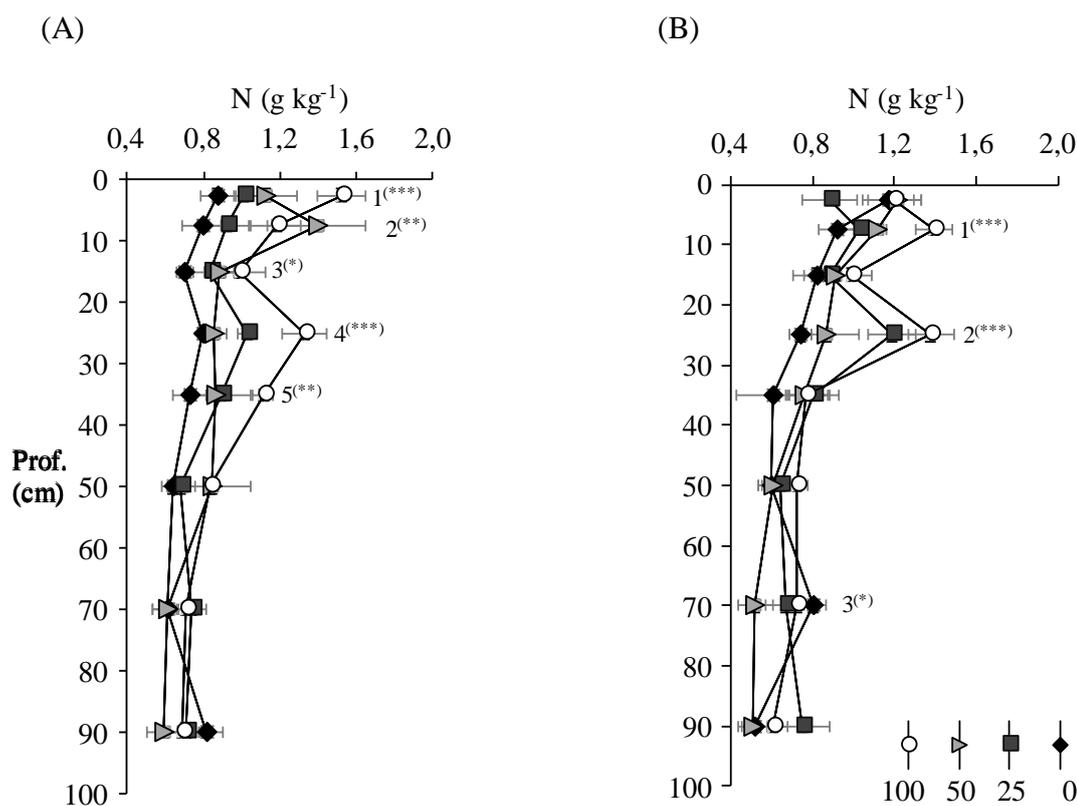


Figura 16. Teores de nitrogênio total do solo (g kg^{-1}) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

A= linha com 0,9 m (linha não trafegada) e B= linha com 1,5 m (linha trafegada). **A:** ⁽¹⁾ $y = 0,006454x + 0,847$, $r^2 = 0,98$; ⁽²⁾ $y = -0,000124x^2 + 0,017072x + 0,73089$, $r^2 = 0,80$; ⁽³⁾ $y = 0,002714x + 0,7325$, $r^2 = 0,94$; ⁽⁴⁾ $y = 0,004714x + 0,7925$, $r^2 = 0,71$; ⁽⁵⁾ $y = 0,003523x + 0,744$, $r^2 = 0,90$. **B:** ⁽¹⁾ $y = 0,00479x + 0,905$, $r^2 = 0,99$; ⁽²⁾ $y = 0,004526x + 0,817$, $r^2 = 0,87$; ⁽³⁾ $y = 0,000058x^2 - 0,007409x + 0,8209$, $r^2 = 0,84$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs. Em todas as camadas avaliadas não houve diferença significativa entre os diferentes espaçamentos de linha (0,9 x 1,5 m).

O sistema de colheita mecânica com a manutenção da palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo interfere na disponibilidade de N à cultura. Na fase inicial de adoção do sistema sem queima, nos primeiros 6 anos, a aplicação da dose de N (fertilizante) não deve ser reduzida, mas pode ser feitas pequenas reduções (10-20% ou 15-40 kg) de médio a longo prazo (15-25 anos). Essa redução da aplicação de N, em sistemas com manutenção da palhada sobre o solo, a longo prazo, se deve principalmente ao possível aumento de C e N total do solo, em 8-15% e 9-24%, respectivamente (Robertson e Thorburn, 2007).

A manutenção da palhada sobre o solo a longo prazo possibilita o aumento da recuperação do N derivado da palhada atingindo o equilíbrio após 40 anos, com uma oferta de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Além disso, garante a manutenção da fertilidade do solo, o que a longo prazo também pode diminuir as despesas com fertilizantes sintéticos (Trivelin et al., 2013).

Entretanto em estudo semelhante, com diferentes níveis de remoção de palha da cana-de-açúcar do solo, Satiro et al. (2017), não encontraram efeitos significativos desses níveis sobre os estoques de N no solo.

A relação C:N do solo (Figura 17) também foi influenciada pelos níveis de palha depositados, em boa parte das camadas avaliadas. Como as variações nos teores de carbono orgânico do solo foram menos expressivas, acredita que esses valores foram mais influenciados pelos teores de N do solo. Os valores médios de relação C:N variaram de 9,5 na camada mais superficial (0-5 cm) a 4,15 na camada mais profunda avaliada (80-100 cm).

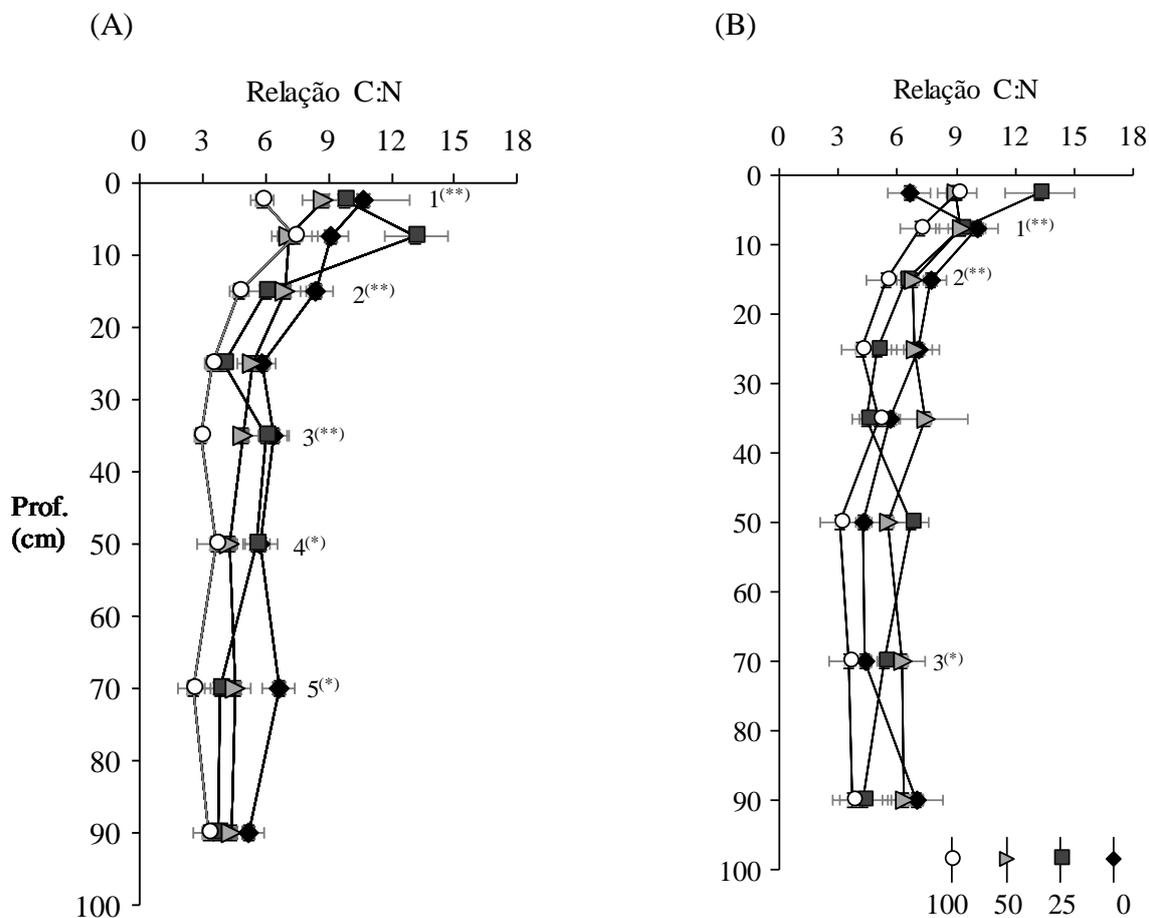


Figura 17. Relação carbono/nitrogênio (C:N) em diferentes camadas, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 m X 1,5 m) de cana-de-açúcar (A e B, respectivamente), avaliados dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis (%) de palha sobre a superfície de Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

A= linha com 0,9 m (linha não trafejada) e B= linha com 1,5 m (linha trafejada). **A:** ⁽¹⁾ $y = -0,049563x + 10,9315$, $r^2 = 0,98$; ⁽²⁾ $y = -0,031791x + 7,8965$, $r^2 = 0,76$; ⁽³⁾ $y = -0,03573x + 6,6195$, $r^2 = 0,98$; ⁽⁴⁾ $y = -0,02305x + 5,8015$, $r^2 = 0,92$; ⁽⁵⁾ $y = 0,000654x^2 - 0,094251x + 6,3486$, $r^2 = 0,85$. **B:** ⁽¹⁾ $y = -0,027563x + 10,114$, $r^2 = 0,93$; ⁽²⁾ $y = -0,02002x + 7,4345$, $r^2 = 0,81$; ⁽³⁾ $y = -0,000655x^2 + 0,06669x + 3,984$, $r^2 = 0,92$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente. Obs. Em todas as camadas avaliadas não houve diferença significativa entre os diferentes espaçamentos de linha (0,9 x 1,5 m).

3.5.5 Propriedades físicas do solo no tempo zero

Os valores de granulometria do solo, no tempo zero (antes do estabelecimento dos tratamentos), nas áreas de estudo, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, podem ser visualizados na Tabela 10. De maneira geral, a fração que predomina em todas as áreas e camadas avaliadas é a areia, com valores de no mínimo 70% e no máximo de 85%. Os menores valores de areia foram observados na área de MATA e os maiores nas áreas de cana-de-açúcar (0,9 m e 1,5 m). Em todas as áreas e camadas avaliadas, os teores de areia grossa prevalecem sobre os teores de areia fina, entretanto os teores dessa também se apresentam de maneira expressiva. Os valores de silte são menores que 11% e semelhantes na área de cana-de-açúcar (0,9 m e 1,5 m) e MATA. Mas, de maneira geral a área de MATA apresentou valores levemente maiores de argila que a área sob cultivo de cana-de-açúcar, contudo nas camadas de 40-60, 60-80 e 80-100, as diferenças são ainda menos perceptíveis.

Para os valores de densidade da partícula (tabela 11), em todas as camadas avaliadas, observou-se semelhança entre as áreas, sendo que os valores variaram de 2,47 a 2,63 Mg m⁻³. Mas, os valores de densidade do solo e porosidade total (tabela 11), de maneira geral, são menores e maiores, respectivamente, na área sob vegetação de MATA, e maiores nos diferentes espaçamentos da área de cana-de-açúcar (1,5 m e 0,9 m).

Contudo, esse efeito é mais pronunciado da camada superficial do solo até os 40 cm de profundidade. Entre essas profundidades, também verificou-se que os valores de densidade do solo e porosidade total, na área de cultivo de cana-de-açúcar, tendem a ser maiores e menores, respectivamente, no espaçamento de 1,5 m do que o de 0,9 m. Isso possivelmente devido ao espaçamento de 1,5 m ter sido mais compactado do que o de 0,9 m. Pois, as colheitadeiras trafegam somente nas linhas de 1,5 m. Assim, acredita-se que nos próximos anos de cultivo esse efeito, provavelmente se pronuncie.

Tabela 10. Granulometria do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado –PR.

Prof. (cm)	Areia Total			Areia Grossa			Areia Fina			Argila			Silte		
	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA
 %														
0-5	85	84	71	58	55	48	29	28	23	13	13	20	2	4	9
5-10	77	84	72	49	52	47	28	32	25	12	12	20	11	4	8
10-20	83	84	74	50	56	47	32	28	27	13	13	21	4	2	5
20-30	79	75	74	48	38	54	31	37	20	14	15	20	7	11	6
30-40	81	80	75	41	48	47	40	32	28	16	16	23	3	4	2
40-60	75	73	75	43	44	48	32	29	27	19	19	22	6	9	3
60-80	74	74	74	43	46	46	31	28	28	20	21	22	6	5	4
80-100	74	76	70	41	49	43	33	27	27	20	21	21	6	3	9
Média geral	78	79	73	47	48	47	32	30	26	16	16	21	6	5	6

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m).

Tabela 11. Atributos físicos do solo sob vegetação de mata e cana-de-açúcar, após colheita de cana-planta em espaçamento duplo (1,5 x 0,9 m), em Colorado-PR.

Prof. (cm)	Densidade do Solo			Densidade da Partícula			Porosidade Total		
	1,5 m	0,9 m	MATA	Mg m ⁻³			%		
	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA	1,5 m	0,9 m	MATA
0-5	1,61	1,46	1,15	2,56	2,56	2,56	37,34	42,90	55,04
5-10	1,63	1,44	1,24	2,53	2,54	2,60	35,72	36,13	52,12
10-20	1,70	1,58	1,43	2,57	2,53	2,50	33,62	37,47	42,82
20-30	1,76	1,65	1,44	2,47	2,48	2,53	28,84	33,45	43,08
30-40	1,73	1,66	1,51	2,55	2,61	2,63	32,03	36,41	42,46
40-60	1,62	1,63	1,52	2,55	2,55	2,50	36,39	36,17	39,23
60-80	1,56	1,53	1,44	2,55	2,61	2,47	38,64	41,28	41,80
80-100	1,50	1,56	1,46	2,52	2,58	2,53	40,33	39,64	42,40
Média geral	1,64	1,57	1,40	2,54	2,56	2,54	35,36	37,93	44,87

1,5 m: Linha trafegada (espaçamento 1,5 m); 0,9 m: Linha não trafegada (espaçamento 0,9 m).

3.5.6 Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo

Na camada de 0-5 cm, nas linhas com espaçamento de 0,9 m (não trafegada) (Figura 18A) e 1,5 m (com tráfego) (Figura 18B), no 1º ano de avaliação, a fração leve livre (FLL) e a fração leve intra-agregada (FLI), apresentaram modelo quadrático. O esperado era que o tratamento com 100% resultasse em maiores valores dessas frações em relação aos demais níveis de palha, contudo esse efeito foi encontrado no tratamento com 50% de palha. Pois, a taxa de decomposição da FLL está intimamente relacionada à umidade do solo, temperatura, biodegradabilidade intrínseca e disponibilidade de nitrogênio (Six et al., 2002).

Embora o aporte da palha da cana-de-açúcar atue positivamente na manutenção e aumento do C das frações da matéria orgânica do solo, as condições edafoclimáticas de cada região de cultivo também são preponderantes nesse processo (Thorburn et al., 2012). Assim, acredita-se que a decomposição da palhada no tratamento 100% em relação aos níveis 25 e 50% de palha foi retardada, devido aos altos teores de umidade do solo, resultante do atípico alto índice pluviométrico, registrado no período desse estudo (Figura 1) e da camada densa de palha, diminuindo a velocidade de entrada de material vegetal na superfície do solo para compor a FLL e FLI.

Sabe-se que a umidade do solo apresenta papel fundamental na atividade da microbiota do solo, entretanto, em condições extremas (solo seco e molhado) ela pode tornar-se limitante aos processos vitais dos microrganismos. Ao incubar amostras de solo superficial saprofítico, na Carolina do Norte, sob diferentes temperaturas (25 e 37°C) e umidade volumétrica do solo (0,15, 0,30 e 0,45 m³ m⁻³), Taggart et al. (2012), observaram uma resposta quadrática do C mineralizado aos diferentes níveis de umidade do solo, em ambas temperaturas. Onde os maiores teores de C mineralizado foram observados no solo úmido (0,30 m³ m⁻³ que correspondeu a 50% do espaço poroso saturado por água), contudo em condição de solo molhado (75 % do espaço poroso saturado por água) o C mineralizado diminuiu. O que corrobora em grande parte com o estudo de Saidy (2013), o qual observou, em amostras de solo incubado, diminuição na taxa de mineralização do C quando o solo estava com mais de 80% do espaço poroso saturado por água, e para a mineralização do N quando o solo estava com mais de 50% do espaço poroso saturado por água.

Em experimento de longa duração (30 anos), realizado na China, sob rotação milho/trigo, Zhao et al. (2016), observaram que nas áreas com maior retorno de palha de milho (50 e 100% de palha - 4,5 e 9,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente), associadas a fertilização nitrogenada e fosfatada, o aporte de massa seca de fração leve (FL) é maior. Aumentando 14,7 e 48,0 %, nos tratamentos com 50 e 100% de palha (ambos com adubação), respectivamente, em relação ao tratamento com 0% de palha (com adubação). O aporte de FL encontrado por esses autores foi de 6,5, 7,5, 7,7, 8,6 e 11,1 mg g⁻¹ de solo, nos tratamentos com 0% de palha (sem adubação), 0, 25, 50 e 100% de palha com adubação, respectivamente. Contudo, o conteúdo de C na fração leve (CFL) foi de 1,18, 1,12, 1,24, 1,50 e 2,03 mg C g⁻¹ de solo, para os tratamentos com 0% de palha (sem adubação), 0, 25, 50 e 100% de palha com adubação, respectivamente, indicando que o maior aporte de FL resulta em maior aporte de C dessa fração.

Ao avaliar diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo (11,3, 8,5, 5,7 e 2,8 Mg ha⁻¹), em experimento situado em Araras-SP, Ramos et al. (2016) não encontraram efeito dos níveis de palha sobre a taxa de decomposição da biomassa nem da mineralização do C, hemicelulose, celulose e lignina, em uma única soca (3ª soca). Contudo, verificaram efeito linear sobre a mineralização do N, com decréscimo dos valores em função do aumento dos níveis de palha, o que segundo os autores indicou imobilização do N nos maiores níveis de palha. Na 4ª soca, esses autores observaram efeito quadrático dos níveis de palha sobre a

mineralização do N e decomposição da biomassa, com menores valores próximo do tratamento com 50% de palha e maiores nos tratamentos com 75 e 100% de palha, que de acordo com os autores, propiciaram maiores níveis de umidade do solo favorecendo a atividade microbiana.

A camada densa de palha, além de manter a umidade do solo e diminuir a perda da mesma, segundo Timm (2002), reduz a temperatura do solo em até 8°C nos primeiros 6 cm de profundidade do solo. E estudos têm comprovado que em temperaturas mais baixas a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo diminui (Taggart et al., 2012; Wang et al., 2016).

No 2º ano de avaliação (2ª soca), provavelmente o maior tempo de deposição dos níveis crescentes de palha no solo, possibilitou o aumento linear da FLI, em ambos espaçamentos da linha de cultivo (Figura 18A e 18B) na camada de 0-5 cm, e no espaçamento de 0,9 m na camada de 5-10 cm (Figura 18C). Indicando que quanto maior o nível de deposição de palha no solo maior o aporte de FLI e conseqüentemente maior o armazenamento de C no sistema.

A FLI possui menor massa em relação ao solo total que a FLL. Os menores teores de FLI em comparação a FLL (Figura 18), nos dois anos de avaliação (1ª e 2ª soca), em ambos espaçamentos (0,9 e 1,5 m) e camadas avaliadas (0-5 e 5-10 cm), podem estar relacionados a baixa capacidade de agregação do solo, o qual possui mais de 80% de areia nas camadas superficiais e ao curto tempo de instalação do experimento. Além disso, é importante ressaltar que nesse estudo, para o fracionamento físico densimétrico foi utilizado TFSA (< 2,00 mm). Assim, os agregados de tamanhos maiores que 2,00 mm foram destruídos no preparo das amostras de TFSA, logo as frações leves intra-agregado neles presentes foram contabilizadas como FLL.

Li et al. (2016), sugerem que os macroagregados apresentam um ambiente mais favorável ao crescimento microbiano do que os microagregados, o que influencia na oclusão da fração leve livre. Esses autores, ao estudarem o mecanismo de distribuição e sequestro do C dos resíduos vegetais em agregados do solo, com baixo conteúdo de argila, em experimento com amostras de solo (0-20 cm) sob monocultivo de milho na China, incubadas em condições de temperatura e umidade controladas por dois anos, verificaram que menos de 40% do C do agregado foi derivado da palha do milho, e que o aporte de C advindo desse resíduo é ainda menor nos microagregados. Nesse mesmo estudo, observaram ainda que ao longo do tempo de incubação o C da fração leve livre foi diminuindo o que se remete a decomposição microbiana.

A textura arenosa do solo dificulta a proteção da fração leve livre no interior dos agregados do solo, pois esses geralmente são poucos e quando presentes apresentam baixa estabilidade, pois os agentes cimentantes responsáveis pela formação e estabilização desses são escassos. Em estudo realizado em Argissolo Amarelo, em Linhares-ES, em área de produção de cana-de-açúcar conduzida com e sem queima da palhada, por 14 anos, Pinheiro (2007), não conseguiu coletar os agregados, pois os mesmos eram escassos. Segundo a autora, nessa área o único agente cimentante responsável pela agregação do solo era os coprólitos de minhocas.

De maneira geral, independente dos níveis de palha, a linha trafegada (1,5 m) possibilitou menor incremento de FLL na camada de 5-10 cm (6,24 g kg⁻¹) (Figura 18D). Já as linhas sem tráfego (0,9 m), em especial na camada superficial (0-5 cm) (Figura 18A), favoreceram mais o aumento da FLL apresentando em média aporte de 9,23 g kg⁻¹ de solo. O que evidencia o efeito negativo da compactação do solo nas linhas com tráfego, e da menor entrada de resíduos vegetais na camada subsuperficial do solo (5-10 cm), no aporte de FLL.

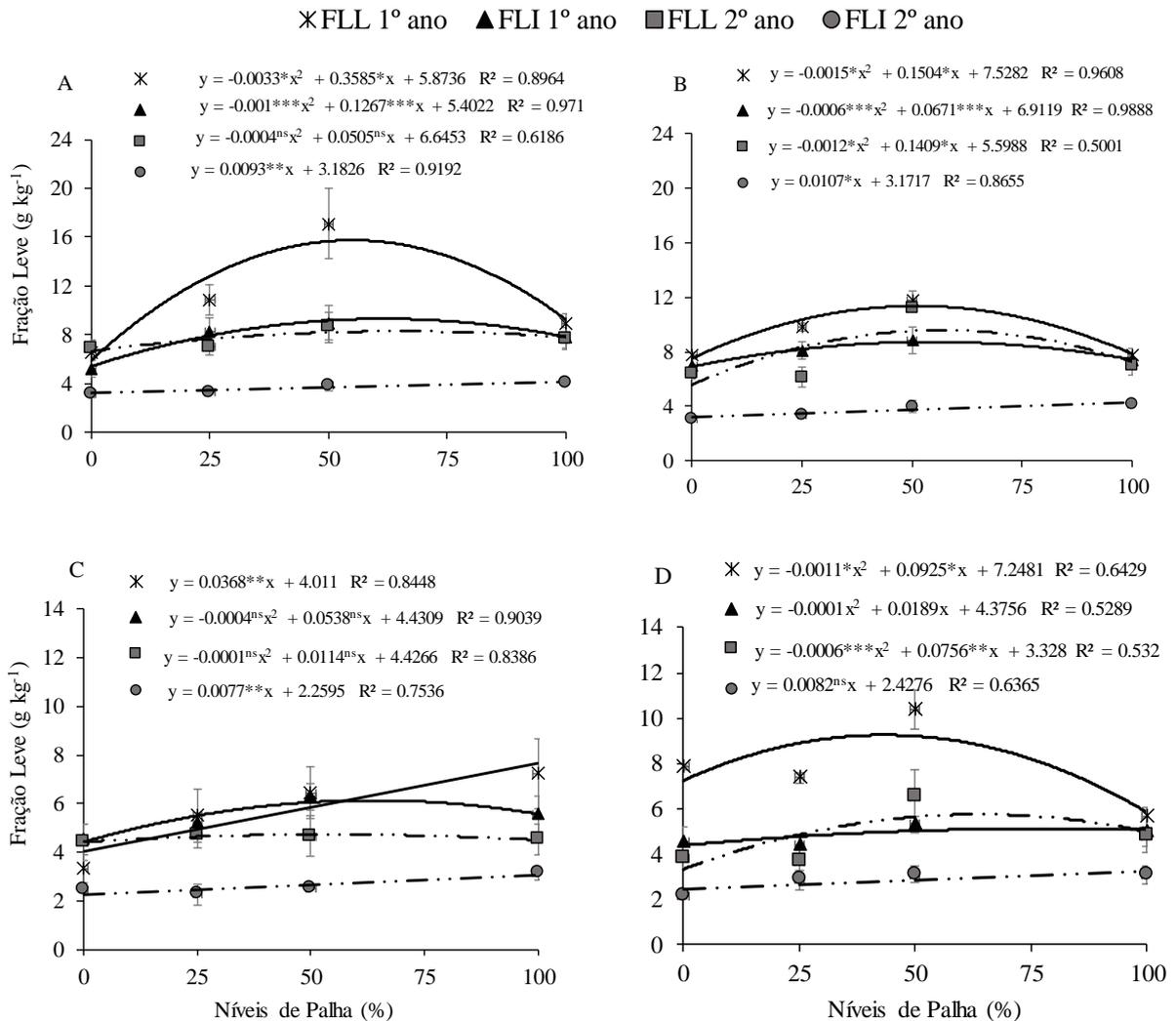


Figura 18. Frações leves da matéria orgânica do solo (FL) na camada de 0-5 cm (A, B) e na de 5-10 cm (C e D), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliadas um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado -PR

A= FL na linha com 0,9 m (linha não trafegada) na camada de 0-5 cm, B= FL na linha com 1,5 m (linha trafegada) na camada de 0-5 cm, C= FL na linha com 0,9 m (linha não trafegada) na camada de 5-10 cm, D= FL na linha com 1,5 m (linha trafegada) na camada de 5-10 cm; FLL= fração leve livre; FLI= fração leve livre intra-agregado; *, ** e *** Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo ($p > 0,10$).

Como esperado, os valores de FLL e FLI são maiores na camada mais superficial (0-5 cm) do que na camada de 5-10 cm, independente dos tratamentos avaliados. Em ensaio experimental realizado em Queensland, Austrália, em áreas sob cultivo de quarta soca da cana-de-açúcar, conduzidas desde o plantio sob colheita sem queima da palhada e com queima da palhada, Blair et al. (1998) observaram que os valores de carbono orgânico total (COT), carbono lábil (CL) e carbono não lábil (CNL) são maiores na área que deixa a palhada sobre o solo (cana-de-açúcar sem queima) quando comparada a área que queima a palhada antes da colheita. Porém, esse efeito se deteve apenas a camada de 0-1 cm. Pois, na camada de 1-25 cm o manejo da palhada não houve alteração significativa nos valores de CT, CL e CNL

do solo. Ao avaliar, nesse mesmo experimento, o $^{13}\delta\text{C}\%$, nas camadas de 0-1 e 1-25 cm, esses autores observaram que as porcentagens de carbono do solo advindo da vegetação C_4 (cana-de-açúcar), foi de 77,7 e 64,0 %, respectivamente, na área com manutenção da palhada, em comparação a 48 e 46 %, respectivamente, na área com queima da palhada. Esses resultados confirmam que a manutenção da palhada sobre a superfície do solo beneficia os compartimentos do carbono orgânico do solo, mas que esse efeito é mais pronunciado na camada mais superficial do solo.

3.5.7 Agregação do solo

Na linha sem tráfego (0,9 m), os diferentes níveis de palha aplicados na superfície do solo, um ano após a instalação do experimento, proporcionaram efeito significativo sobre os valores de diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP), na camada de 0-10 cm, com comportamento linear positivo, onde a ausência de palha (0%) apresentou um valor de DMP (0,93 m) 50% menor que o tratamento com 100% de palha (1,86 mm) (Figura 19).

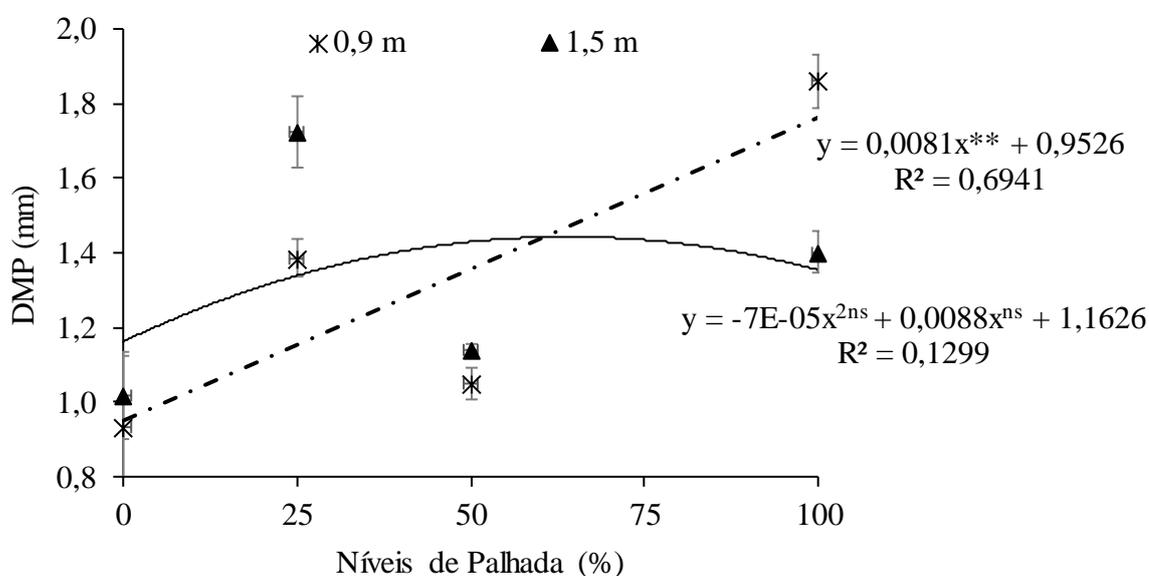


Figura 19. Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo, na camada de 0-10 cm, em espaçamento de plantio duplo alternado (0,9 X 1,5 m) de cana-de-açúcar, avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. ** Significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste t, ns = não significativo.

Contudo, não observou um efeito significativo dos diferentes níveis de palha aplicados na superfície do solo sobre a agregação do solo, nas linhas trafegadas (1,5 m). Os valores de DMP variaram de 1,02 a 1,73 mm, sendo a menor média observada no tratamento com retirada total da palha (0% palha). A ausência de resposta significativa no espaçamento de 1,5 m possivelmente está associada ao tráfego das colheitadeiras perante a colheita da cana-de-

açúcar. Pois o aporte de material vegetal sobre a superfície do solo geralmente é responsável pela melhoria da agregação das partículas do solo (Primavesi, 2006).

A textura franca arenosa do solo em questão prejudica a formação de agregados de tamanhos maiores e mais estáveis em água, o que justifica os baixos valores encontrados de DMP na área de estudo. A matéria orgânica do solo é o principal agente cimentante das partículas de solo de textura grossa (Pinheiro, 2007; John et al., 2005). Contudo, mesmo em condições sob maior aporte de resíduos vegetais o tráfego intenso de máquinas causa perdas da qualidade física do solo, como a diminuição do DMP (Roque et al., 2010).

3.5.8 Densidade e porosidade

Na linha sem tráfego (0,9 m), os diferentes níveis de palha aplicados na superfície do solo, dois anos após a instalação do experimento, proporcionaram efeito significativo sobre os valores de densidade do solo (DS) (Figura 20A) e porosidade total calculada (P) (Figura 21A) apenas nas profundidades (0-5, 10-20 e 20-30 cm). Na camada de 0-5 cm, verificou-se comportamento quadrático positivo para DS e negativo para P, onde os tratamentos com 50 e 0% de palha apresentaram menor e maior valor de DS, respectivamente. A maior P no tratamento com 50% de palha possivelmente está associada ao aumento de FLL na camada de 0-5 cm (Figura 18A). E a menor P no tratamento 0% ao possível selamento superficial causado pelo impacto das gotas de chuva no solo descoberto (Sousa et al., 2012).

E nas profundidades 10-20 e 20-30 cm, ainda na linha sem tráfego (0,9 m) (Figura 20A), observou-se respostas lineares positivas dos valores de densidade do solo (DS) e negativas aos valores de porosidade (P) aos diferentes níveis de palha sobre o solo. Assim, acredita-se que a menor disponibilidade de água, em períodos de menor precipitação, no tratamento sem palha (0%) quando comparada aos tratamentos com maiores níveis de palha (50 e 100%), estimulou o crescimento do sistema radicular o que possivelmente aumentou a porosidade do solo (P).

Em áreas de cultivo de cana-de-açúcar sob sequeiro e irrigadas, ou seja, em condições de menor e maior disponibilidade de água, respectivamente, localizadas em Capim (PB), Farias et al. (2008) observaram que quando irrigada, a cana emite mais rapidamente o seu sistema radicular sobretudo nos primeiros 15 cm de profundidade do solo, com um volume radicular maior na superfície em relação a condição de sequeiro, porém a maior massa de raízes foi encontrada na cana-de-açúcar sob sequeiro na camada de 16-30 cm.

Já nas linhas com tráfego de máquinas (1,5 m), os diferentes níveis de palha aplicados na superfície do solo, proporcionaram efeito significativo sobre os valores de DS (Figura 20B) e P (Figura 21D) somente nas camadas 0-5 e 20-30 cm. Na camada superficial, verificou-se comportamento linear positivo para DS e negativo para P, onde o tratamento com 100% de palha apresentou maior valor de DS e menor de P, em relação aos demais níveis de palha. Essa resposta, possivelmente ocorreu em razão da maior quantidade de palha propiciar teor de umidade do solo acima do ponto de friabilidade, no momento da colheita, causando compactação na camada superficial do solo.

Em condições iguais de umidade do solo os maiores níveis de palha minimizam a compactação do solo (Rosim et al., 2012), pois a palha aumenta a área de contato pneu-solo quando comparada ao solo descoberto, diminuindo o risco de compactação do mesmo (Vischi Filho et al., 2015). Porém, em estudo com quantidades crescentes de palha de milheto (0, 5, 10 e 15 Mg ha⁻¹) em superfície, sob Latossolo Vermelho (textura argilosa), Rosim et al. (2012), observaram no rastro do trator, que os maiores níveis de palha aumentaram a umidade do solo e reduziram a resistência a penetração em relação aos menores níveis.

O aumento da umidade favorece a desagregação das partículas do solo, pois diminui o atrito das mesmas (Souza et al., 2012). Assim, em condições que a maior quantidade de palha sobre a superfície do solo resulta em níveis de umidade superiores ao correspondente ao limite de plasticidade do solo a compactação do solo pode ser potencializada.

Além da umidade do solo, acredita-se que a textura do mesmo também interfere no grau de compactação do mesmo perante a colheita mecânica da cana-de-açúcar. Satiro et al. (2017), em dois solos com texturas distintas, em experimentos com diferentes níveis de remoção de palha (0, 25, 50 75 e 100%) da cana-de-açúcar, não verificaram efeito significativos dos níveis de palha sobre os atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo (textura franco-arenosa).

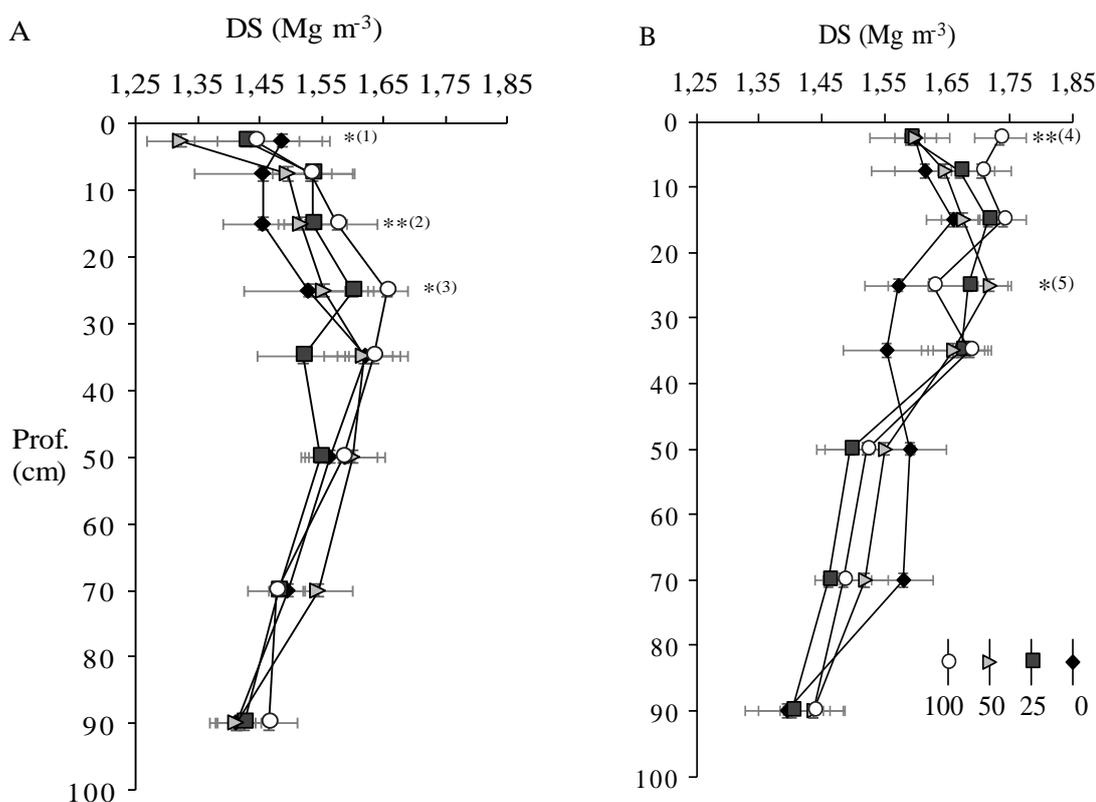


Figura 20. Valores médios de densidade do solo (DS), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR

A= DS na linha com 0,9 m (linha não trafegada), B= DS na linha com 1,5 m (linha trafegada); Níveis de palhada: 0%, 25%, 50% e 100%; Profundidades do solo: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm); ⁽¹⁾ $y = -0,000048x^2 - 0,0054x + 1,50$, $r^2 = 0,85$; ⁽²⁾ $y = 0,0010x + 1,48$, $r^2 = 0,802$; ⁽³⁾ $y = 0,0011x + 1,54$, $r^2 = 0,68$. ⁽⁴⁾ $y = 0,0014x + 1,57$, $r^2 = 0,77$; ⁽⁵⁾ $y = -0,000047x^2 + 0,0052x + 1,58$, $r^2 = 0,99$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Contudo, esses autores verificaram aumento da densidade e resistência do solo à penetração com o aumento da remoção de palha, nas camadas superficiais de um Latossolo Vermelho (textura franco-argilo-arenosa), sendo essa resposta contrária a encontrada nesse estudo. Esse resultado encontrado por Satiro e colaboradores, possivelmente se deve a baixa umidade do solo, ou seja, valores menores que 14 %.

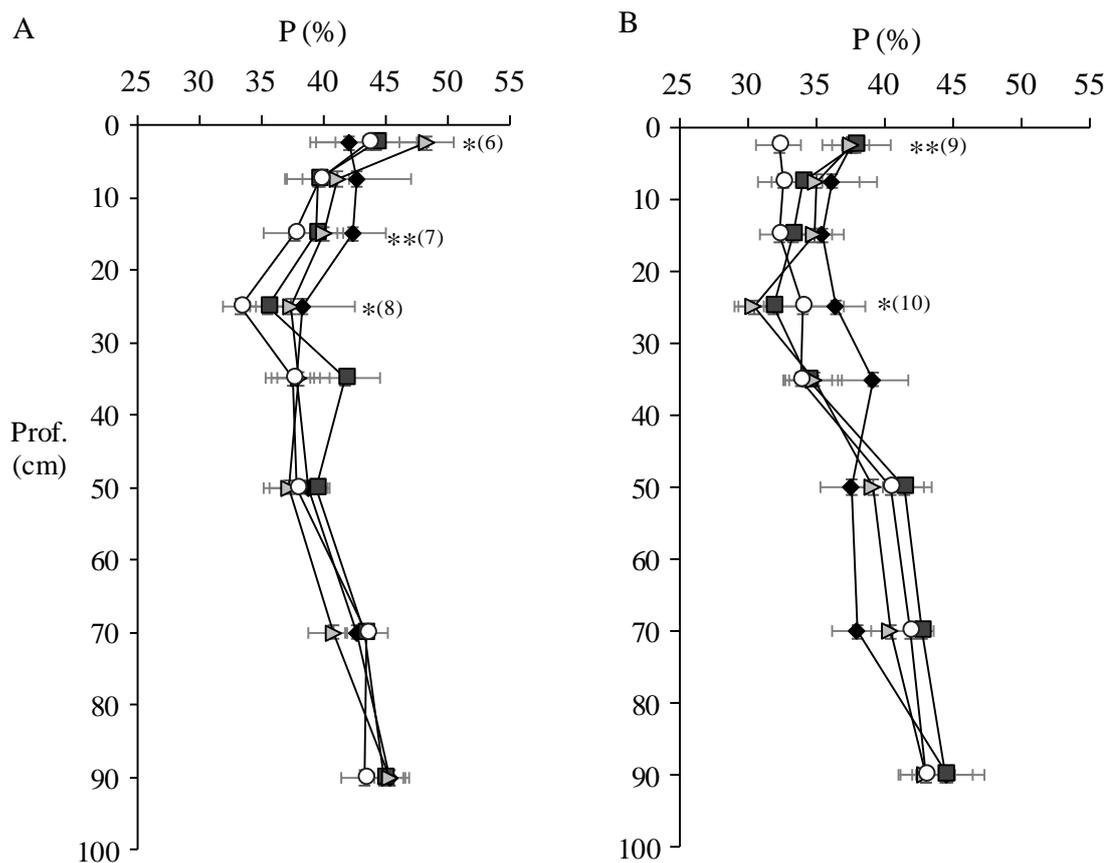


Figura 21. Valores médios de e porosidade total calculada (P) (A e B), em espaçamento de plantio duplo alternado (1,5 m X 0,9 m) de cana-de-açúcar, avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR

A= P na linha com 0,9 m (linha não trafegada), B= P na linha com 1,5 m (linha trafegada); Níveis de palhada: 0%, 25%, 50% e 100%; Profundidades do solo: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm); ⁽⁶⁾ $y = -0,00185x^2 + 0,2182x + 41,48$, $r^2 = 0,85$; ⁽⁷⁾ $y = -0,0410x + 41,66$, $r^2 = 0,79$; ⁽⁸⁾ $y = -0,0435x + 37,97$, $r^2 = 0,69$. ⁽⁹⁾ $y = -0,056x + 38,76$, $r^2 = 0,77$; ⁽¹⁰⁾ $y = 0,00197x^2 - 0,2186x + 36,32$, $r^2 = 0,99$. ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

3.5.9 Emissão de óxido nitroso

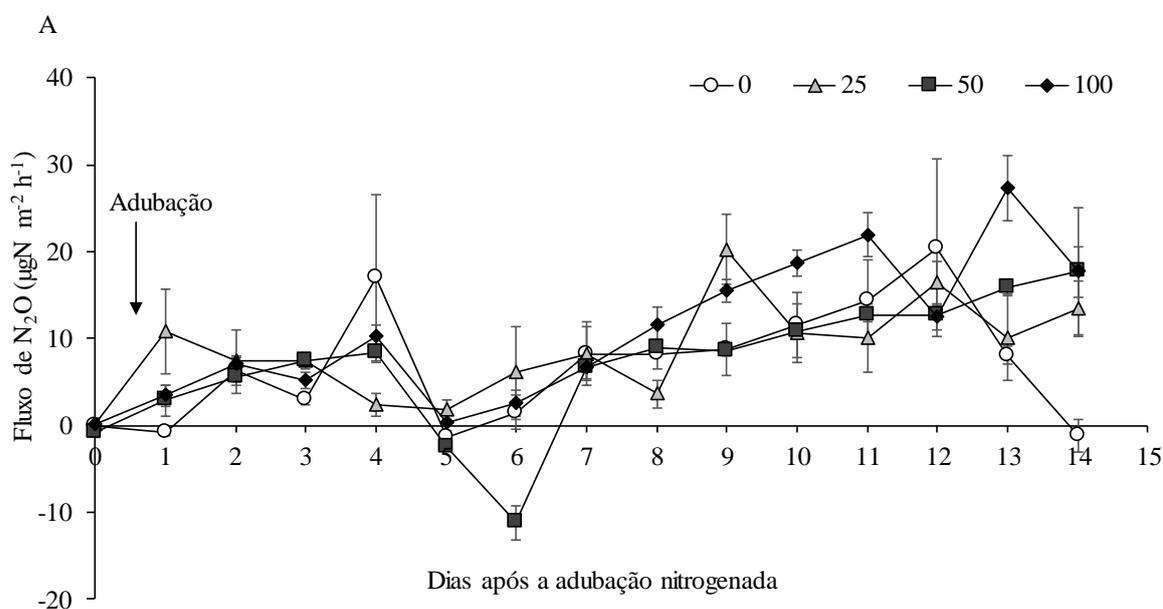
Os picos de fluxos de N_2O (Figura 22A), sob diferentes quantidades e manejo da palhada da cana-de-açúcar, foram observados a partir do primeiro dia após a adubação nitrogenada, sendo que, no dia da adubação nitrogenada houve uma precipitação (PPT) de 35 mm (Figura 24). Contudo, os picos com maiores fluxos de N_2O foram observados somente 13 dias após a adubação onde, o tratamento com maior quantidade de palha sobre o solo (100%), apresentou maior valor de fluxo de N_2O em comparação aos tratamentos com menores níveis de palha (0, 25 e 50%). A PPT registrada do 8º ao 12º dia após a adubação favoreceu o processo de desnitrificação, onde NO_3^- foi reduzido a N_2O .

O aumento do espaço poroso saturado por água (EPSA) (Figura 24) favorece o processo de desnitrificação nos microsítios anóxicos do solo. Contudo, esse processo só é efetivo em condições de EPSA maior ou igual a 70%. Em valores de EPSA entre 30 e 60% o processo que predomina é o de nitrificação, resultando em baixos valores de emissão de N_2O (Bateman e Baggs, 2005). Os estudos de Jantalia et al. (2008) e Martins et al. (2015)

comprovam que as maiores emissões de N_2O no solo se concentram após a adubação nitrogenada nos períodos de maiores precipitações.

Os maiores valores de fluxos acumulados (Figura 22B) foram verificados, principalmente, nos últimos 5 dias de avaliação (10 à 14 dias após a adubação), no tratamento com 100% de palha em relação ao demais tratamentos. Neste mesmo período de avaliação de emissão acumulada também se observou que o tratamento com 100% de palha apresentou os maiores valores principalmente em relação ao tratamento com 50% de palha. Isso, possivelmente, ocorreu devido ao menor EPSA, observado 11 dias após a adubação (Figura 24), no tratamento com 50% em comparação ao tratamento 100% de palha.

Além disso, alguns autores acreditam que os maiores fluxos nas áreas sem retirada de palha (100% de palha) ocorrem em razão da palhada conservar mais a umidade do solo e além disso, por beneficiar a atividade microbiana do solo resultando em maior decomposição da palhada e conseqüentemente maior liberação de C solúvel, que favorecem o processo de desnitrificação. Carmo et al. (2013) e Vargas et al. (2013) avaliando o efeito da manutenção e/ou retirada de parte ou totalidade da palhada da cana-de-açúcar do campo sobre os fluxos de N_2O no solo observaram que a manutenção da palhada sobre o solo, principalmente quando em maiores quantidades, aumenta a emissão de N_2O quando comparado ao tratamento que retira toda palhada (sem palha).



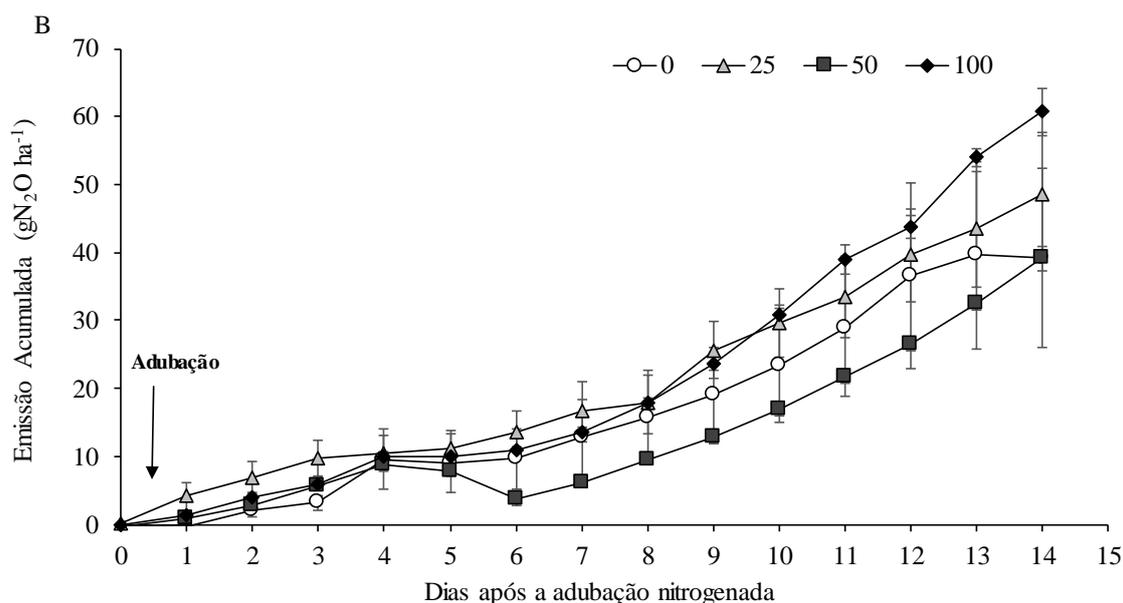


Figura 22. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N₂O, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha⁻¹, fonte: sulfato de amônio).

Ao avaliar o efeito de doses crescentes (0, 50 e 100%) de palhada de cana-de-açúcar sobre o solo, em experimentos conduzidos em Piracicaba-SP, em diferentes tempos após a colheita da cana-de-açúcar (logo após a colheita, 6 e 12 meses após a colheita), Signor et al. (2014) não observaram efeito das doses de palha sobre a emissão de N₂O logo após a colheita e em 12 meses após a colheita. Mas, observaram efeito das doses de palha no experimento avaliado aos 6 meses após a colheita, onde ao contrário do observado na literatura, o fluxo médio de N₂O diminuiu com o aumento da quantidade de palha sobre a superfície.

O aumento no teor de N-NH₄⁺ um dia após a adubação, possivelmente se deve a solubilização do sulfato de amônio que foi favorecida pela precipitação registrada no dia anterior (Figura 23A). Mas, acredita-se que parte do N-NH₄⁺ foi oxidado a NO₃⁻ através do processo de nitrificação, principalmente entre 2º e 7º dia após a adubação, período com menor registro de precipitação (Figura 24). E no 5º no tratamento com 100% de palha observou-se maior solubilização do sulfato de amônio no solo, aumentando o teor de N-NH₄⁺ no solo (23 A). E no 11º dia verificou-se o processo de nitrificação na maioria dos tratamentos (0, 25 e 100%), com conseqüente aumento do teor de N-NO₃⁻ (Figura 23B).

Os valores de N-NO₃⁻ (Figura 23B), observados em 11 e 14 dias após a adubação foram maiores no tratamento com 25% de palha em relação aos demais tratamentos, embora tenha ocorrido essa discrepância entre os tratamentos os valores encontrados são relativamente baixos.

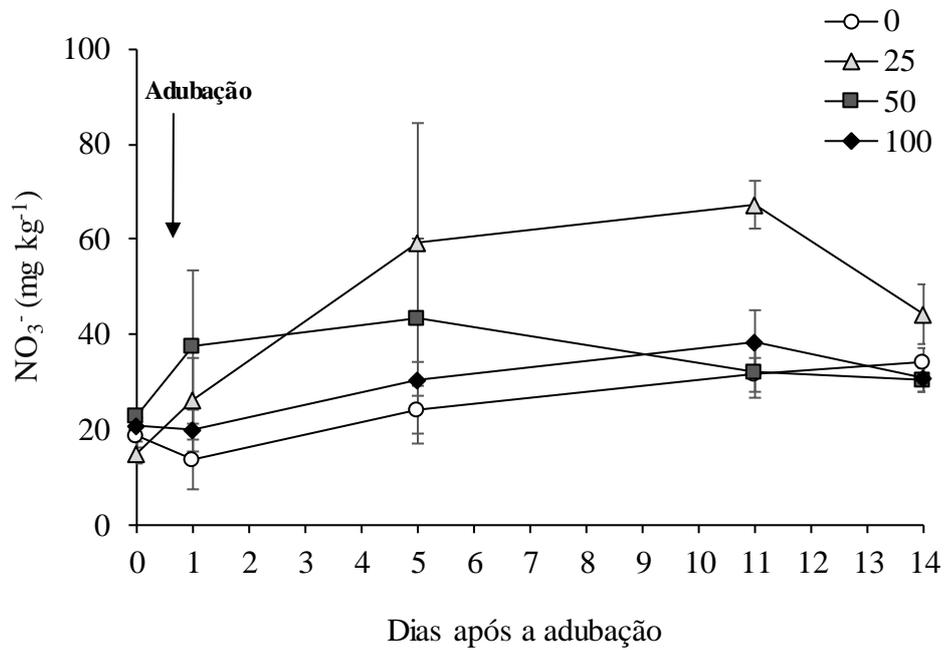
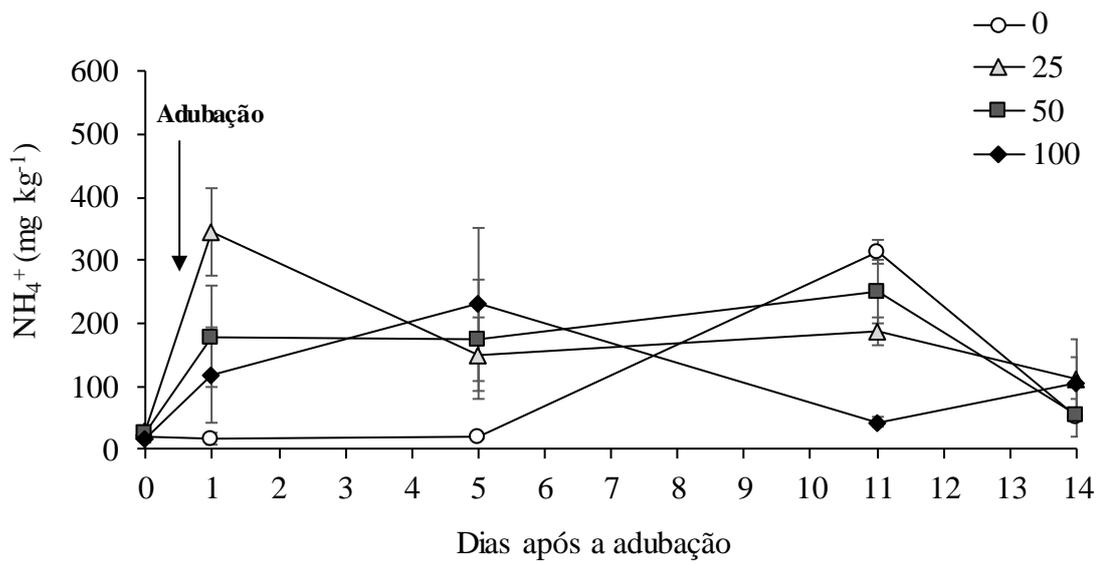


Figura 23. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha^{-1} , fonte: sulfato de amônio).

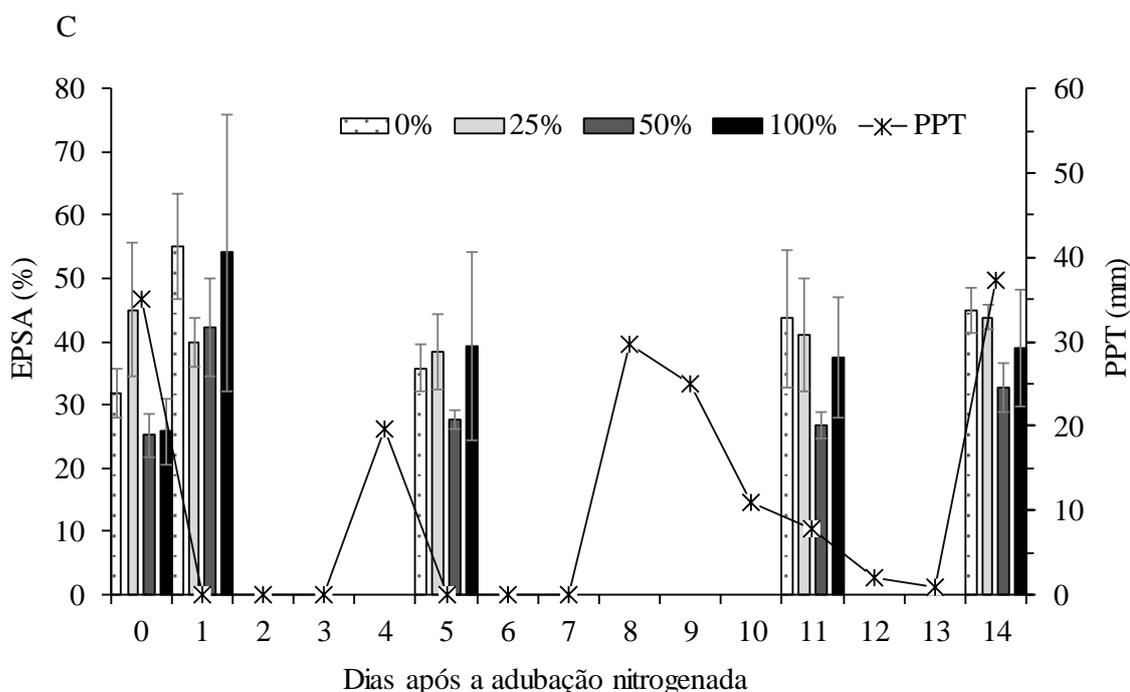


Figura 24. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR

No segundo ano de coleta do gás óxido nitroso, ou seja, aproximadamente 2 anos após a instalação do experimento em Paranaíba-PR, o fluxo de N_2O (Figura 25 A) e a emissão acumulada de N_2O (Figura 25 B) apresentaram valores médios de $-0,24 \mu g N_2O m^{-2} h^{-1}$ e $-0,31 g ha^{-1}$ de N_2O , respectivamente, sendo considerados valores muito baixos. Esse resultado, possivelmente, foi devido à baixa incidência de chuva no período de coleta (Figura 27) que resultou em baixos valores de espaço poroso saturado por água (EPSA) (42%). Nesse ano choveu muito pouco no momento da amostragem, mas o solo tinha água retida nos poros. A precipitação pode atuar na solubilização do adubo, maior contato do mesmo com o solo, e consequentemente em maiores perdas de N_2O . Mesmo com um razoável valor de EPSA (50-60) não houve emissão.

Os valores de EPSA no tratamento sem palha apresentou os menores valores em relação aos demais tratamentos, em especial 3 dias após a adubação nitrogenada (21,06%), sendo 55% menor que o tratamento com 100% de palha sobre a superfície do solo (46,49%). A baixa emissão de N_2O em solos com EPSA menor que 60% é bastante comum, emissões mais altas são observadas quando o solo apresenta valores de EPSA maiores que 80% (Bateman e Baggs, 2005; Baggs et al., 2003; Duxbury et al., 1982).

Baixos índices pluviométricos nos dias de coleta do gás (Figura 27) associados a baixa capacidade de retenção de água no solo, possivelmente, contribuíram para menores valores de EPSA e, consequentemente, para baixos fluxos de N_2O no solo (Lopes et al., 2017).

No segundo e primeiro ano de avaliação da emissão de óxido nitroso do solo, foram verificados muitos valores baixos e até negativos (Influxo) de N_2O . Esse resultado é comum em condição de baixa precipitação (Carvalho et al., 2013; Metay et al., 2007).

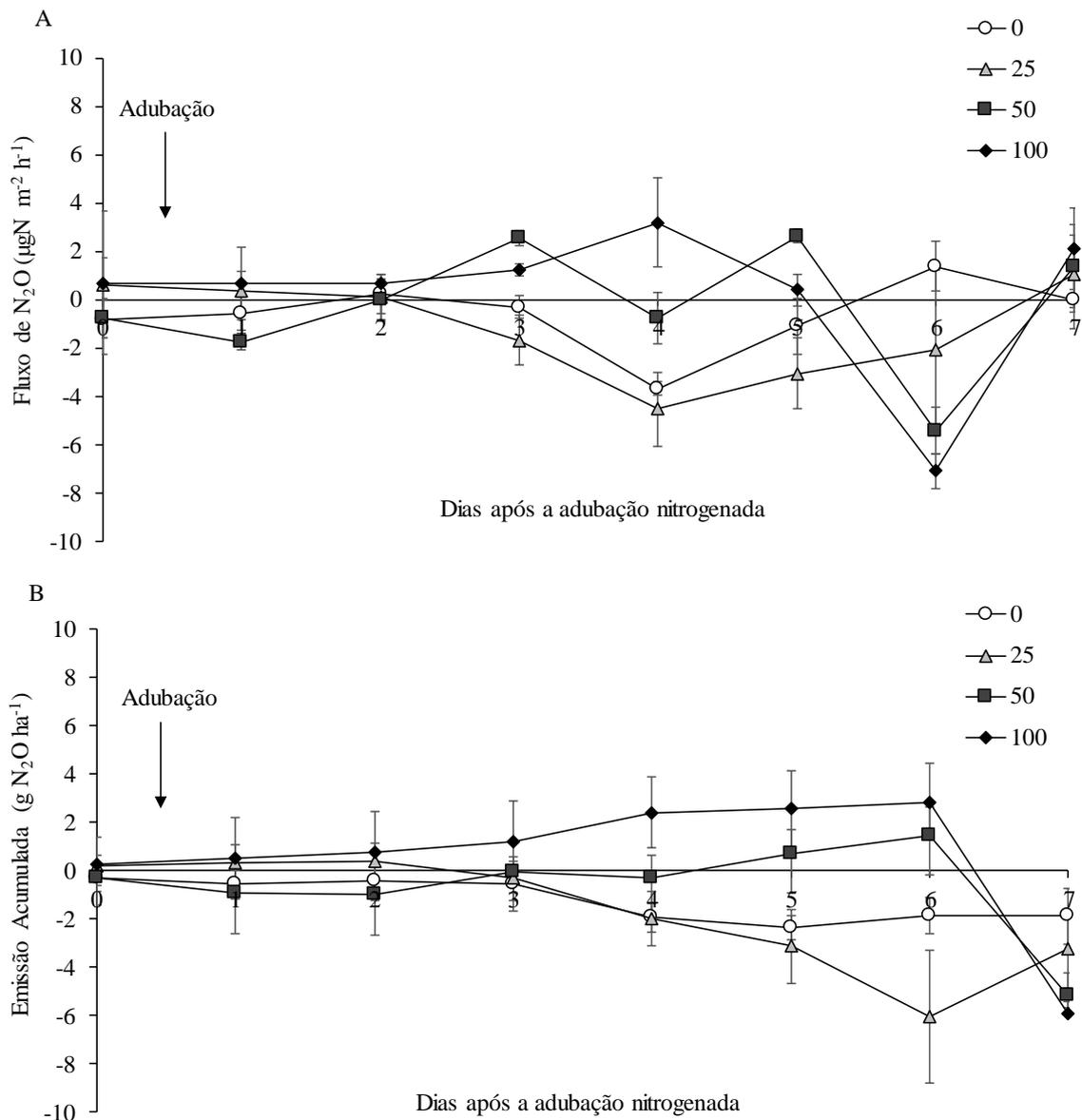


Figura 25. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N₂O, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha⁻¹, fonte: sulfato de amônio).

A baixa emissão de N₂O também corrobora com os baixos valores de N-NO₃⁻ (menores que 40 mg kg⁻¹) (Figura 26 B) observados durante o período de coleta do gás. Os altos valores de N-NH₄⁺ (Figura 26 A) observados após a adubação nitrogenada se deve ao amônio presente no adubo aplicado (sulfato de amônio), que foi solubilizado nos tratamentos com maior deposição de palhada (Figura 26B). De maneira geral, os estudos com emissões de óxido nitroso do solo têm encontrado correlações positivas entre as emissões e os teores de umidade e nitrogênio no solo, sendo as maiores emissões encontradas logo após a adubação nitrogenada das culturas (Martins et al., 2015; Carmo et al., 2013; Smith et al., 2004).

Também se verificou nos dias de coleta de solo para avaliação do N-mineral (1, 3, 5 e 7 dias após a adubação) que os tratamentos apresentaram valores bem discrepantes entre si. Esses valores de N-mineral foram influenciados pela deposição dos diferentes níveis de palha.

Pois, esses níveis proporcionaram diferença de umidade do solo entre os tratamentos, consequentemente da solubilização do adubo nitrogenado, e também em função da barreira física que os níveis de palha fornecem entre o solo e o adubo, principalmente, nos primeiros dias após a adubação e em períodos sem ocorrência de precipitação, já que a adubação foi realizada sobre a palhada. Em estudo com diferentes níveis de palha sobre o solo, em Piracicaba-SP, Carmo et al. (2013) observaram que a aplicação de adubo mineral no solo aumenta a emissão de N_2O , sendo ainda maior quando se mantém 21 $Mg\ ha^{-1}$ de palha sobre a superfície do solo ($4000\ g\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de N_2O). Contudo, na ausência de palha e adubação nitrogenada, os valores de emissão de N_2O são próximos de zero.

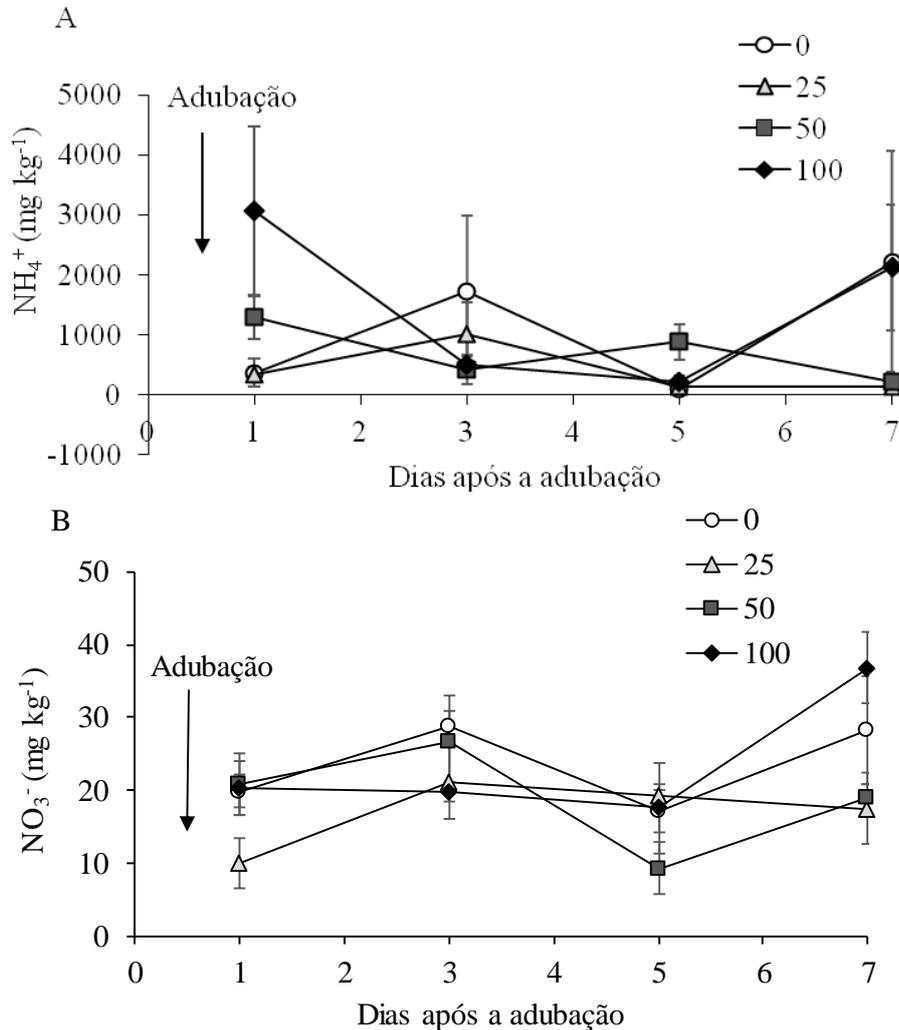


Figura 26. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR. Adubo nitrogenado (dose $100\ kg\ ha^{-1}$, fonte: sulfato de amônio).

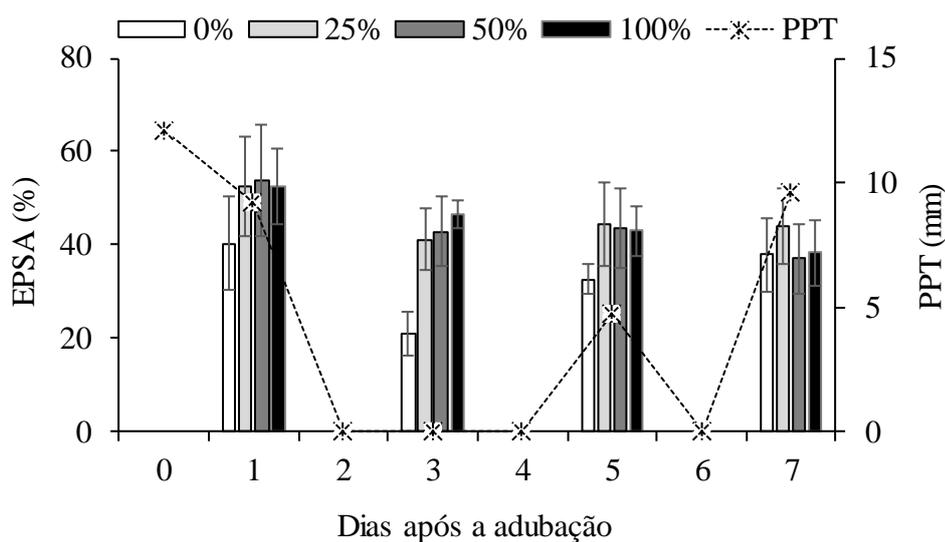


Figura 27. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Latossolo Vermelho, em Colorado-PR

3.5.10 Fauna do solo

Um ano após a deposição de diferentes níveis de palha sob o solo, o maior número total de indivíduos foi observado no sistema com 50% de palha (1007 indivíduos) (Figura 28), seguido pelo sistema pelo tratamento com 25% de palhada indivíduos).

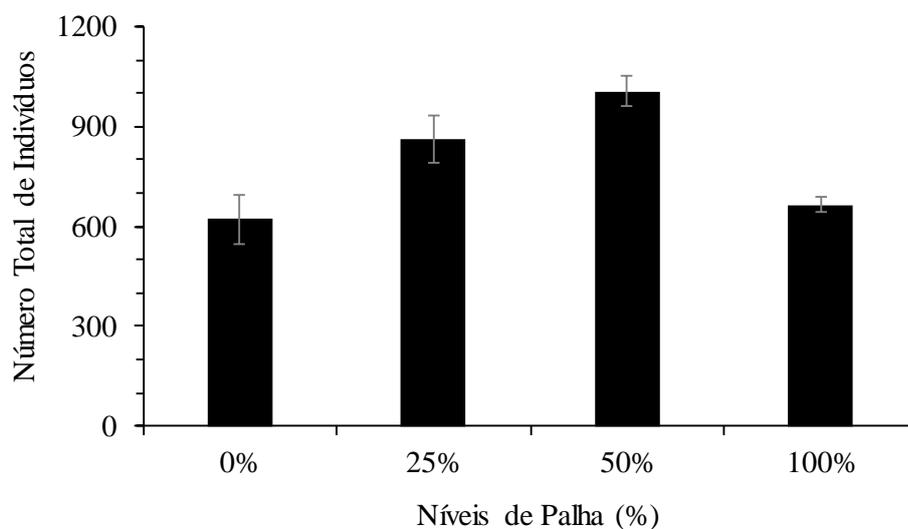


Figura 28. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, no período chuvoso, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar cultivada em espaçamento duplo combinado, em Colorado-PR.

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

Os grupos mais frequentes em todos os tratamentos avaliados foram Entomobryomorpha, Diptera e Larva de Diptera (Figura 29).

O número médio de indivíduos por dia capturados nas armadilhas variou de 22,18 à 35,96 (Tabela 12), sendo os menores valores observados nos tratamentos com 0% e 100% de palhada (22,18 e 23,79, respectivamente), e o maior valor no tratamento com 50% de palhada (35,96).

Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Abreu et al. (2014), em estudo realizado em União-PI, em experimento com cana-de-açúcar sob diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Esses autores também encontraram menores valores de indivíduos por armadilha nos sistemas com 0% (15,1) e 100% (15,7) de palha, e maiores valores nos sistemas com 50% (27,8) e 75% (33,1), isso para as amostras coletadas no período chuvoso. Entretanto, nas amostras coletadas em período seco, Abreu et al. (2014) observaram, maiores valores de indivíduos por armadilha nos sistemas com 25% (14,7) e 100% (13,2) de palha. Contudo, o sistema sem palha sobre a superfície do solo (0%) continuou com a menor média (11,1) entre os tratamentos avaliados. Assim, é possível verificar a influência do período de coleta na fauna do solo, e que a ausência de palhada sobre a superfície do solo influencia negativamente sobre os organismos invertebrados da fauna do solo.

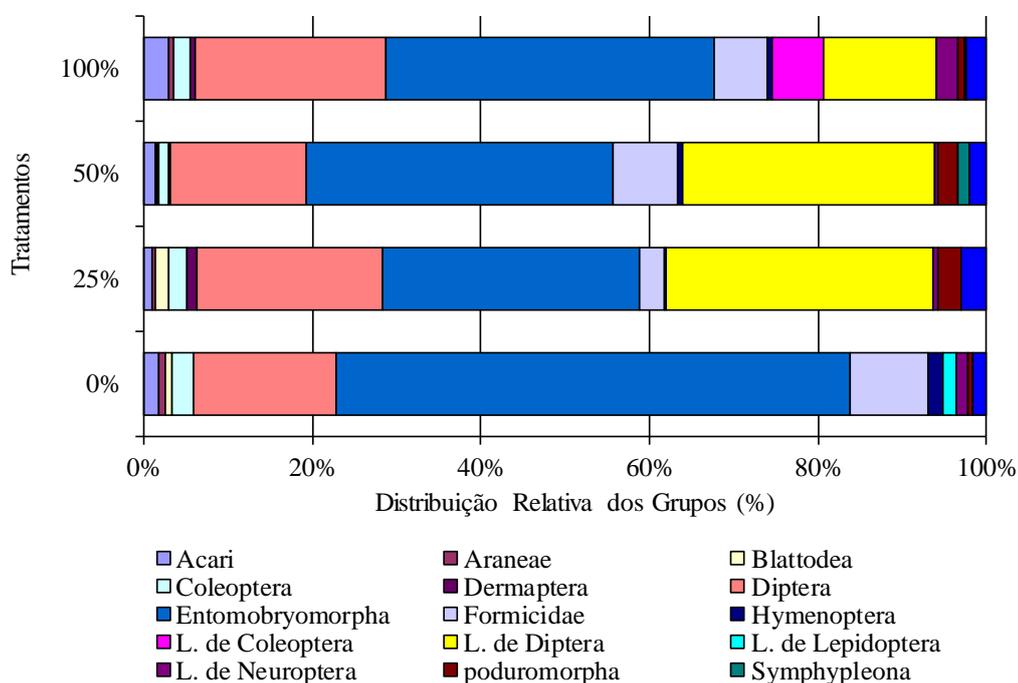


Figura 29. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistema duplo combinado dois anos após a instalação de diferentes níveis de palhada, em Colorado-PR.

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

Em relação aos índices ecológicos (Tabela 12), observa-se que a riqueza média e a riqueza total apresentaram valores semelhantes entre os tratamentos, variando de 8,5 à 10,5 e de 15 à 18, respectivamente. E que para os índices de Shannon (diversidade de grupos) e de Pielou (equitabilidade dos grupos) os maiores valores foram verificados nas parcelas que mantiveram toda a palhada produzida pela cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, os sistemas com 100% e o enleirado (enlei), e o menor valor no sistema com 0% de palha. O

menor índice de Pielou está associado a dominância por poucos grupos, esse pode variar de 0 à 1. Índices de Pielou próximos de 0 representam baixa uniformidade de distribuição dos indivíduos dentro dos grupos observados. E índices próximos de 1 representam alta uniformidade de distribuição dos indivíduos nos grupos observados (Pasqualin et al., 2012). O menor valor observado no sistema com 0% (0,51) é atribuído a simplificação do mesmo, o que seleciona os grupos mais adaptados a essa condição, que no caso foi o grupo Entomobryomorpha (Figura 29).

Tabela 12. Número médio de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, em diferentes níveis de palhada (Colorado - PR, out. 2015).

TRATAMENTO	Indivíduos armadilha ⁻¹ dia ⁻¹	Erro Padrão	Riqueza Média	Riqueza Total	Índice de Shannon	Índice de Pielou
0%	22,18	6,95	9,67	15	1,98	0,51
25%	30,82	10,12	10,5	18	2,47	0,59
50%	35,96	6,34	9,25	16	2,33	0,58
100%	23,79	3,42	10,5	18	2,66	0,64

Tratamentos = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

No segundo ano de coleta da fauna epigéica do solo, ou seja, aproximadamente 2 anos após a instalação do experimento em Colorado –PR, o número total de indivíduos foi maior nos tratamentos com maior aporte de resíduos vegetais (100%, e na mata, 1069, e 1086 indivíduos, respectivamente) em relação ao tratamento sem palha (847 indivíduos) e com 25% de palha sobre o solo (719 indivíduos) (Figura 30).

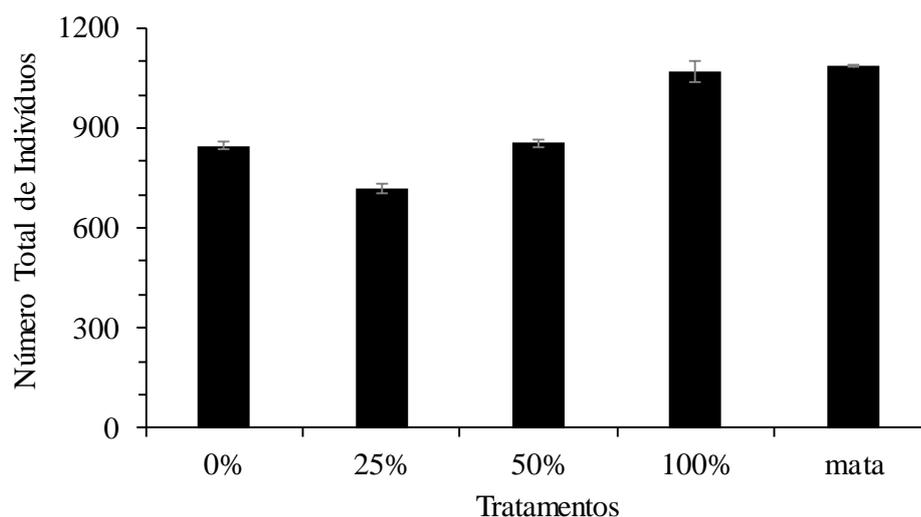


Figura 30. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, dois anos após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar cultivada em espaçamento duplo combinado, em Colorado –PR.

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%); e área de mata..

De maneira geral, independentemente do nível de palha aplicado no solo, observou-se a dominância do grupo Entomobryomorpha (45,2%), seguido de Formicidae (13%) e Diptera (12,11%) (Figura 31) sobre os demais grupos.

A dominância do grupo Entomobryomorpha, ordem inserida na superordem Collembola, tem sido apontada em diversos estudos com fauna epigéica do solo (Guimarães et al., 2016; Silva et al., 2013; Barreta et al., 2006). Isso se deve a alta adaptabilidade desse grupo a diferentes condições climáticas e a sua maior mobilidade (Abreu et al., 2014).

A riqueza média e total da fauna invertebrada do solo apresentaram valores discrepantes entre si, com os menores valores observados nos tratamentos com 0% (7,25 e 8,0) e 25% (10,5 e 14,0) de palha em relação aos tratamentos 50% (9,0 e 12,0) e com 100% (17,0 e 19,0) e principalmente em relação a mata (21,5 e 23,0) (Tabela 13). Em relação a equitabilidade dos grupos (Índice de Pielou) nos diferentes manejos da palha da cana-de-açúcar observou-se valores semelhantes entre os tratamentos (0,69 o valor médio), contudo a área de mata apresentou valor levemente mais elevado (0,73), como era esperado (Tabela 13).

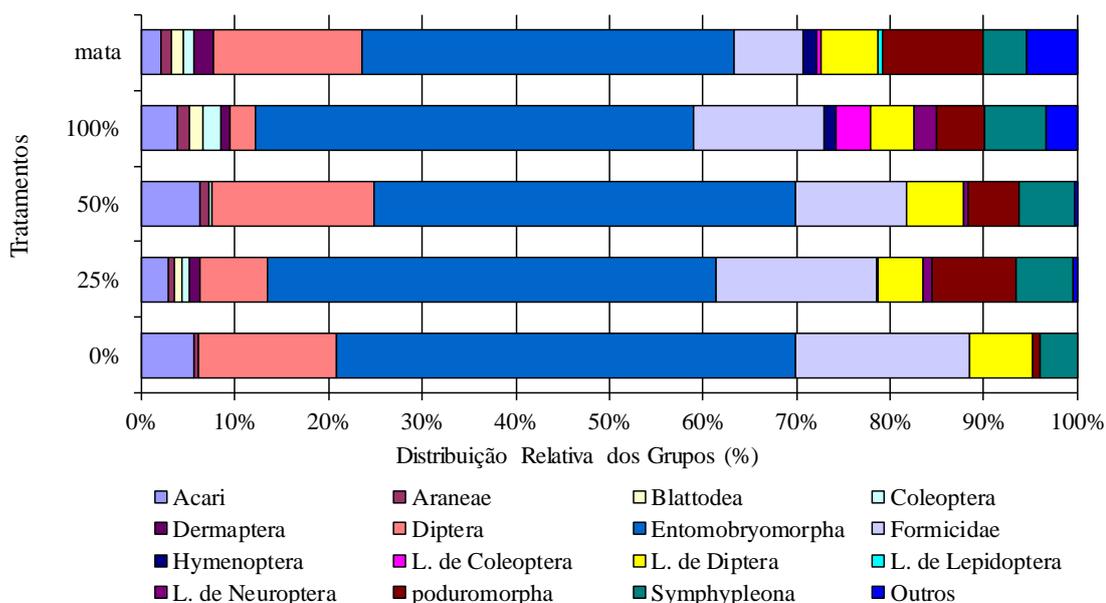


Figura 31. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, dois anos após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar em sistema duplo combinado em diferentes níveis de palhada, em Colorado -PR

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%); e área de mata.

O valor de índice de Shannon (Tabela 13) também foi maior na área de mata (3,29) em relação aos tratamentos da área de cana-de-açúcar (média de 2,58). Nas duas coletas realizadas (1º e 2º ano), a retirada da mata para a entrada da agricultura influencia a atividade biológica do solo. Pelo índice de Shannon, manter a palhada na superfície do solo é mais benéfico a fauna do solo do que a retirada total da palhada. Observou-se ainda que o maior aporte de palhada (100%) proporcionou o aumento do índice de Shannon, com valor de 31,0 % maior que o tratamento sem deposição de palha sobre a superfície do solo (2,14), o que indica que a retirada de toda a palha da superfície do solo diminui a diversidade da fauna do solo e aumenta a dominância dos grupos mais adaptados a condições mais escassas de energia, umidade e até mesmo abrigo.

Tabela 13. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Colorado - PR, julho. 2016)

TRATAMENTO	Indivíduos armadilha ⁻¹ dia ⁻¹	Erro Padrão	Riqueza Média	Riqueza Total	Índice de Shannon	Índice de Pielou
0%	30,25	3,03	7,25	8,00	2,14	0,71
25%	25,68	2,57	10,50	14,00	2,48	0,65
50%	30,54	3,05	9,00	12,00	2,44	0,68
100%	38,18	3,82	17,00	19,00	2,80	0,66
mata	38,79	3,88	21,50	23,00	3,29	0,73

Tratamentos = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%); e área de mata.

3.6 CONCLUSÕES

A manutenção de 50% de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo aumentou a produtividade de colmos na região sul do país.

A remoção total da palha do solo nas linhas não trafegadas (0,9 m) aumentou a acidez do solo, com diminuição dos valores de pH e Ca^{2+} (0-5 e 5-10 cm) e aumento dos valores de H+Al (5-40 cm).

Nas linhas trafegadas (1,5 m), os principais efeitos dos níveis de palha mantidos sobre o solo são observados em camadas subsuperficiais do solo (10-20 e 20-40 cm), onde a manutenção de 50 % de palha resulta em reduções dos valores de H+Al (10-20), de Ca^{2+} e pH (20-40) com um ano de experimento.

A maior extração de nutrientes via colheita dos colmos, nos tratamentos com manutenção de 25 e 50% de palha, aumentou a acidez do solo e diminuiu os teores de fósforo assimilável, nas linhas trafegadas em camadas mais profundas (30-40 e 60-100 cm) dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo.

A manutenção de 100% resultou em maior aporte de carbono na camada superficial (0-5 cm) em linha não trafegada, um ano após a aplicação. Contudo, na linha trafegada a manutenção de 50% de palha foi mais eficiente em aumentar o carbono e nitrogênio no solo.

A remoção total da palha do solo (0% de palha) diminuiu os teores de carbono nas linhas não trafegadas (0,9 m) e trafegadas (1,5 m) nas camadas de 0-5 e 5-10, respectivamente.

Com dois anos de manutenção de 100% de palha da cana-de-açúcar sobre o solo ocorre aumento do conteúdo de nitrogênio nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm na linha não trafegada (0,9 m) e nas camadas de 5-10 e 20-30 cm na linha trafegada (1,5 m).

O efeito da remoção de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo nos atributos químicos e físicos do solo foi influenciado pelo tráfego de máquinas.

A manutenção de 50% da palha sobre a superfície do solo, em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente em sistema de plantio duplo alternado (1,5 x 0,9 m), também aumentou o aporte da fração leve livre e da fração leve intra-agregado da matéria orgânica do solo, na camada superficial (0-5 cm), após um ano de cultivo.

Dois anos após a instalação do experimento, a fração leve intra-agregado respondeu de forma linear positiva à deposição dos níveis crescentes de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo. O não recolhimento e a manutenção de toda a palha (100%) sobre o solo apresentou o maior potencial para aumentar o conteúdo de carbono estabilizado no solo.

A manutenção de diferentes níveis de palha sobre o solo alterou a DS e P, nas linhas com (1,5 m) e sem tráfego (0,9 m) de máquinas, principalmente nas camadas mais superficiais do solo. Na linha sem o tráfego (0,9 m) de máquinas, a manutenção de 50% da palhada proporcionou uma maior porosidade do solo na camada superficial.

A maior umidade do solo, ocasionada pela manutenção de 100% de palha e por altos e atípicos índices pluviométricos, no momento da colheita, favoreceu a compactação do solo na linha com tráfego de máquinas (1,5 m), principalmente na camada de 0-5 cm, refletindo negativamente na produtividade de colmos.

No primeiro ano, a manutenção de 100% de palha sobre o solo proporcionou condições favoráveis à emissão de óxido nitroso (N_2O) após a adubação nitrogenada do solo, principalmente em período de maior precipitação. Esse comportamento não foi observado no segundo ano, em que foram obtidas muito baixas e negativas emissões de N_2O .

A fauna do solo foi sensível aos níveis de palha da cana-de-açúcar aplicados ao solo. A manutenção de 100% de palha aumenta a diversidade e equitabilidade dos grupos da fauna epigeica do solo.

As condições edafoclimáticas da região de cultivo foram favoráveis ao desenvolvimento e manutenção dos grupos Entomobryomorpha e Diptera, independentemente do nível de palha aplicado sobre o solo.

4 CAPÍTULO II

MANEJO DA PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR E QUALIDADE DO SOLO, PRODUÇÃO DA CULTURA E EMISSÃO DE N₂O EM LINHARES-ES

4.1 RESUMO

A remoção de parte da palha da cana-de-açúcar da superfície do solo para a co-geração de energia ou álcool de segunda geração tem potencial para tornar a cultura da cana-de-açúcar ainda mais promissora do ponto de vista energético e econômico. Mas, pouco se sabe dos efeitos dessa remoção sobre a qualidade do solo, emissão de óxido nitroso e produtividade de colmos. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar, num período de dois anos consecutivos, o efeito de quatro níveis de deposição da palha (0, 25, 50 e 100 %) sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, emissão de óxido nitroso e produtividade da cana-de-açúcar. A área de estudo está localizada na região Sudeste do país, no município de Linhares (ES). O solo é classificado como Argissolo Amarelo, com textura franco arenosa. Os resultados indicam que a remoção total da palha nessas condições de estudo é prejudicial a qualidade do solo e ao rendimento de colmos. A manutenção de 100% de palha ($9,20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) aumenta os valores de K^+ na camada superficial e diminui a acidez do solo nas camadas subsuperficiais (10-20 e 20-40 cm), após um ano de aplicação da palha, em ano de baixa disponibilidade hídrica. Com dois anos de manutenção de 100% de palha ocorre aumento do aporte de carbono orgânico (C) e da porosidade total do solo nos primeiros 5 cm de profundidade, dos valores de Ca nas camadas 5-10 e 10-20 cm, e de nitrogênio na camada de 40-60 cm. A manutenção de toda a palha sobre o solo também proporciona melhores condições à sobrevivência da fauna epigeica, bem como maior diversidade de grupos. A fauna epigeica mostra-se muito sensível não só ao manejo da palhada da cana-de-açúcar, mas também às mudanças de clima, onde a escassez ou ausência de chuva influencia diretamente no número indivíduos e na distribuição relativa dos grupos. Em relação a emissão de óxido nitroso do solo, a maior umidade do solo associada a menor porosidade no tratamento sem palha (0% de palha) resulta em maior emissão acumulada. Assim, os resultados obtidos indicam que para a região Sudeste do país, a quantidade de palha da cana-de-açúcar mais adequada para manutenção da qualidade do solo e do rendimento da cultura é de 100% de palha ($9,20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Sugere-se o acompanhamento do experimento por mais tempo, visto que a recomendação desse estudo é com base em resultados de apenas 2 anos.

Palavras-chave: Fracionamento físico. Compactação. Fauna epigeica. Rendimento da Cultura.

4.2 ABSTRACT

The removal of part of the sugarcane straw from the soil surface for energy cogeneration or second-generation alcohol has the potential to make the sugarcane crop even more promising. But little is known about the effects of this removal on soil quality, nitrous oxide emission, and yield of stalks. Thus, the objective of the study presented in this chapter was to evaluate, in two consecutive years, the effect of four levels of straw deposition (0, 25, 50 and 100%) on soil chemical, physical and biological attributes nitrous oxide and sugarcane productivity in the first and second soca variety RB-966928. The study area is Ultisol sandy loam texture, located in the southeast of the country, in Linhares (ES). The results indicate that the total removal of straw in these study conditions is detrimental to soil quality and stem yield. Maintenance of 100% straw ($9.20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) increases the K values in the surface layer and decreases the soil acidity in the subsurface layers (10-20 and 20-40 cm) after one year of straw application in a year of low water availability. With two years of 100% straw maintenance, the organic carbon (C) and total soil porosity increased in the first 5 cm of depth, the values of Ca in the layers 5-10 and 10-20 cm, and nitrogen in the 40-60 cm layer. The maintenance of all the straw on the soil also provides better conditions for the survival of the epigeic fauna, as well as greater diversity of groups. The epigeonic fauna is very sensitive not only to the management of sugarcane straw, but also to changes in climate, where the scarcity or not of rain directly influences the number of individuals and the relative distribution of the groups. In relation to the emission of nitrous oxide from the soil, the higher soil moisture associated with lower porosity in the treatment without straw (0% straw) results in higher cumulative emissions. Thus, the results indicate that in the Southeastern region of the country, the amount of sugarcane straw most adequate to maintain soil quality and crop yield is 100% straw ($9.20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). To ensure a more reliable recommendation of the straw level most appropriate in these study conditions, it is suggested to follow it for longer, since the recommendation of this study is based on results of only 2 years.

Keywords: Maintenance of Straw. Carbon Supply. Soil Compaction. Epigeic Fauna. Yield of Culture.

4.3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar no Brasil ocupa uma área colhida de 8,77 milhões de hectares (Conab, 2017). Apresenta múltiplas formas de uso e aplicação, onde destaca-se a produção de açúcar, etanol, produção de energia (bagaço e palha) e do gás carbônico (CO₂) puro. O ciclo de produção da cana apresenta um balanço energético altamente positivo, sendo considerada uma cultura energeticamente promissora.

A mudança da colheita com queima (maneira manual) para a colheita sem queima (colheita mecânica), principalmente por questões ambientais, contribuiu de forma efetiva para mitigação da emissão de gases do efeito (GEE). Além disso, a camada de palha que fica sobre a superfície do solo resulta em aporte médio de C no solo de 1,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Cerri et al., 2011). Contudo, esse aporte de C depende não só do manejo da palhada, mas também das condições edafoclimáticas de cultivo, do espaçamento de plantio, do manejo de adubação, da variedade cultivada, do tipo de preparo do solo e do manejo de pragas e doenças.

De maneira geral, o aumento da matéria orgânica influencia positivamente nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. A manutenção da palha sobre a superfície do solo contribui na nutrição das plantas devido a sua mineralização, aumenta a capacidade dos solos em reter nutrientes. Protege o solo dos processos erosivos, melhora a agregação e infiltração da água nos sistemas de cultivo. E ainda proporciona um ambiente favorável ao desenvolvimento das comunidades da fauna e microflora do solo.

Outro papel importante da conservação da cobertura do solo nos sistemas de produção da cana-de-açúcar é a manutenção da água no solo (Anjos et al., 2017). Que em condições de estresse hídrico contribuí diretamente na garantia do desenvolvimento da cultura, conseqüentemente na produtividade de colmos (Aquino et al., 2017, 2018). Assim, na região Sudeste do país, mais especificamente no norte do Espírito Santo, que registrou um período de seca severa na safra 2015/2016, a manutenção da palha da cana-de-açúcar no campo tem a capacidade de diminuir os impactos negativos do clima. Graças a maior eficiência de uso da água no sistema que mantém a palha sobre o solo quando comparado ao sistema que retira toda a palha.

Além disso, a densa camada de palha diminui o impacto negativo que o tráfego de máquina causa aos atributos físicos do solo, aumentando ainda a porosidade do solo. De maneira geral, em solos mais arenosos, com menor capacidade de retenção de água associados a condição de clima com menor índice pluviométrico, diminui a emissão de óxido nitroso do solo, mesmo após a fertilização nitrogenada, o que favorece o balanço energético da cultura da cana.

O recolhimento de parte da palha da cana-de-açúcar para geração de energia ou álcool de segunda geral, já tem sido adotado em várias regiões produtoras do Brasil, e pode tornar o ciclo da cultura ainda mais positivo, desde que não cause danos a qualidade do solo e da cultura. Assim, o objetivo geral desse capítulo foi propor a quantidade de palha que garante a manutenção e/ou melhoria da qualidade de solo (Argissolo Amarelo, textura franco-arenosa) e a longevidade da cultura da cana-de-açúcar, na região sudeste do país. Mais especificamente, visa avaliar o efeito da deposição de diferentes níveis de palha (0, 25, 50 e 100%, que correspondeu a 0, 2,3, 4,5 e 9,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de palha, respectivamente) sobre: **a)** os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, os teores de C e N, e o aporte de fração leve na matéria orgânica do solo; **b)** a emissão de N₂O e **c)** produtividade de colmos.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição da área experimental

A pesquisa foi realizada em área experimental instalada na Linhares Agropecuária S.A. no município de Linhares, Estado do Espírito Santo, situado entre os paralelos 19°06' e 19° 18' de latitude Sul e os meridianos 39° 45' e 40° 19' de Longitude Oeste. A altitude local é de 28,0 m. De acordo com a divisão regional do Estado, Linhares faz parte da zona fisiográfica denominada Baixo Rio Doce (EMBRAPA/SNLCS, 1978). Esta região se caracteriza pela ocorrência de extensas áreas de relevo suave ondulado onde uma série de baixos platôs compõe o chamado “relevo tabuliforme”. Os declives raramente são superiores a 3%.

O clima da região corresponde ao tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen, ou seja, clima tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com precipitação pluvial média anual de, aproximadamente, 1280 mm e temperaturas médias máximas e mínimas de 28,75 e 21,5 °C, respectivamente. Os dados de precipitação do período deste estudo são apresentados na Figura 32.

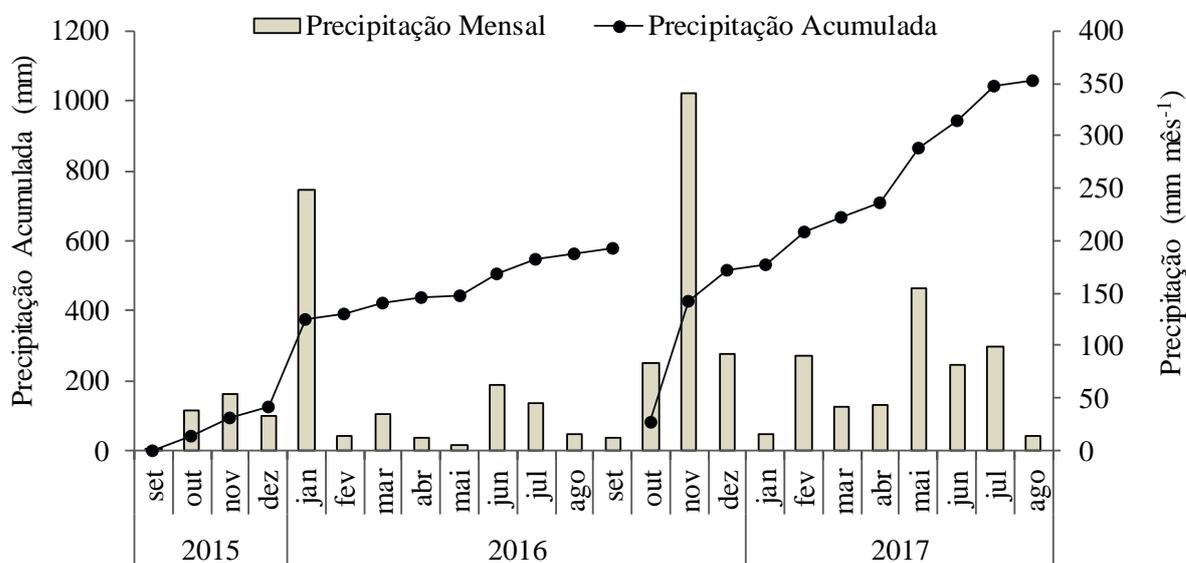


Figura 32. Precipitação pluviométrica durante as socas 2015/2016 (1ª soca) e 2016/2017 (2ª soca), em área experimental com diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar após a colheita, em Linhares-ES.

A estação chuvosa, geralmente, vai de outubro a abril e a época seca abrange os meses de junho, julho e agosto, podendo se estender até setembro (Silva, 2000). A vegetação primária remanescente na região é representada pela floresta tropical subperenifólia.

4.4.2 Histórico de uso e manejo da área

O início de cultivo com cana-de-açúcar na área de estudo ocorreu em 2002, com uso da queima e colheita manual até 2008, a qual a partir do ano de 2009 passou a ser colhida de forma mecânica e sem queima (cana crua). O preparo do solo foi realizado de forma

convencional (maio de 2014), por meio de aração e gradagem, utilizando-se arado de disco e grade niveladora. No plantio os fertilizantes aplicados foram 25 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com as fontes uréia, cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente. A adubação das soqueiras (2016 e 2017) está descrita no item 4.4.12.

O experimento foi instalado em julho de 2015, com diferentes manejos da palhada. Utilizou-se uma área que havia colhido a cana planta a poucos dias, ou seja, com 14 meses de idade, cultivada com a variedade: RB-966928. Essa variedade apresenta hábito de crescimento semi-decumbente, é caracterizada pelo elevado teor de sacarose, com indicação de cultivo em ambientes de médio a alto potencial produtivo, possui alto índice de perfilhamento e muito boa brotação da cana-planta e soqueira.

4.4.3 Tratamentos e delineamento experimental

Cada parcela constou de 8 linhas de cultivo da cana-de-açúcar de 10 m de comprimento, espaçadas por 1,5 m, totalizando 120 m²/parcela, conseqüentemente, uma área total de 2400 m².

Nesta área foi instalado um experimento semelhante ao descrito no Capítulo I, (Material e Métodos, item 3.4.2), a diferença consiste no espaçamento entre as linhas de plantio de cana-de-açúcar, que neste estudo em Linhares (ES) foi de 1,5 m. Os tratamentos (T1, T2, T3 e T4), também descritos nos itens 4.1.3, foram aplicados da mesma forma que os da área de Colorado-PR.

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, totalizando 16 parcelas experimentais.

No momento das safras avaliadas (2015/2016 e 2016/2017) a cana se encontrava em 1^a e 2^a soca, respectivamente. Os tratamentos foram aplicados em setembro de 2015 e outubro de 2016, onde após a colheita mecanizada da cana planta e 1^a soca, respectivamente, as quantidades médias de palha aplicadas foram: 0, 2,58; 4,8 e 9,9 Mg ha⁻¹ e 0, 2,1; 4,3 e 8,5 Mg ha⁻¹, que corresponderam, respectivamente, à manutenção em campo de 0, 25, 50 e 100% da palha (folhas secas, ponteiros e restos de colmo).

Para a determinação do peso de palha das parcelas experimentais correspondentes aos níveis com 25%, 50% e 100% de palha sobre o solo, após a colheita da cana planta e da 1^a soca, toda a palhada remanescente dentro de cada parcela foi pesada, e em seguida espalhada na área, obedecendo às quantidades determinadas para cada tratamento. Nas parcelas correspondentes a 0% de palha, removeu-se toda a palhada presente na área.

4.4.4 Caracterização dos perfis do solo em Linhares-ES

A caracterização morfológica (Santos et al., 2005), física e química (EMBRAPA, 1997), dos perfis do solo em Linhares-ES, foi realizada antes da implantação do experimento (julho de 2015).

Nos horizontes superficiais verificou-se, a estrutura do tipo granular (Hor. A) e granular/blocos subangulares e (Hor. AB), e matiz 10YR (Tabela 14). Nos horizontes subsuperficiais observou-se a estrutura de blocos subangulares, matiz 10YR, sendo que no horizonte Bt₂ também observou-se a presença de mosqueado, com matiz 7,5YR comum, médio e distinto. A consistência analisada (Tabela 14), quando seca esteve entre solta a dura, quando úmida, esteve entre muito friável e friável, e quando molhada, esteve entre não plástica a plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa.

Em todos os horizontes os teores de argila foram inferiores a 403 g kg⁻¹ (Tabela 15). A mudança textural abrupta do horizonte A para o Horizonte B permitiu a identificação do

horizonte Bt. O grau de flocculação nos horizontes estudados foi baixo, principalmente nos horizontes subsuperficiais, sendo inferiores a 19 %. Os valores de densidade do solo (Ds) variaram de 1,51 a 1,68 Mg m⁻³ (Tabela 16) e a porosidade total de 27 a 39 %.

Os valores de pH em água variaram entre 4,77 e 5,78 (Tabela 17). Nos horizontes AB, Bt₁ e Bt₂ observaram-se maior acidez e teor de Al⁺³ que o horizonte A. Além disso, verificaram-se que de maneira geral os valores de bases trocáveis (Ca⁺², Mg⁺² e K⁺) decrescem do horizonte A para os horizontes B, assim a soma de bases e valor V% também seguem esse padrão (Tabela 17). Os valores de V % inferiores a 50% (V < 50 %) nos horizontes diagnósticos subsuperficiais identificam esse solo como distróficos (Santos et al., 2013).

Tabela 14. Principais atributos morfológicos do perfil do solo da área de estudo em Linhares-ES.

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor Munsell		⁽²⁾ Estrutura	Consistência			Textura
		Matriz	Mosqueado ⁽¹⁾		⁽³⁾ Seca	⁽⁴⁾ Úmida	⁽⁵⁾ Molhada	
A	0-16	10YR 3/2		F, MP, G.	S	MF	NP e LPe	Areia
AB	16-30	10YR 4/3		F, MP/P, BS/G.	S/M	MF	NP e LPe	Areia
Bt ₁	30-88	10YR 5/4		F/M, P/M, BS.	LG	F	LPL e LPe/Pe	Franco Argilo Arenosa
Bt ₂	83-120 ⁺	10YR 5/6	7,5YR 4/6 Med.	M, M/G, BS.	D	F	PL e Pe	Franco Argilo Arenosa

⁽¹⁾ Co: comum; Med: médio; Dis: distinto. ⁽²⁾ Estrutura: grau de desenvolvimento (F: fraco, M: moderado), tamanho (MP: muito pequeno, P: pequeno, M: médio), tipo (G: granular, BS: blocos subangulares, BA: blocos angulares). ⁽³⁾ Consistência no estado seco (S: solta, M: macia, LD: ligeiramente dura, D: dura, MD: muito dura, ED: extremamente dura). ⁽⁴⁾ Consistência no estado úmido (MF: muito friável, F: friável, Fr: firme, EFr: extremamente firme). ⁽⁵⁾ Consistência no estado molhado (NP: não plástica, LPL: ligeiramente plástica, PL: plástico, LPe: ligeiramente pegajosa, Pe: pegajosa).

Tabela 15. Granulometria, argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF) e relação silte/argila do perfil do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Horiz.	Prof. (cm)	Granulometria			ADA	GF	Silte/Argila
		Areia	Silte	Argila			
	 g kg ⁻¹ TFSA					%
A	0-16	910	14	75	58	23	0,19
AB	16-30	884	20	96	78	18	0,21
Bt ₁	30-88	697	68	234	189	19	0,29
Bt ₂	83-120 ⁺	567	30	403	326	19	0,07

Tabela 16. Densidade do solo, densidade da partícula e porosidade total do perfil do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Horiz.	Prof. (cm)	Densidade (Mg m ⁻³)		Porosidade Total (%)
		Solo	Partícula	
A	0-16	1,56	2,54	39
AB	16-30	1,68	2,52	33
Bt ₁	30-88	1,68	2,29	27
Bt ₂	83-120 ⁺	1,51	2,40	37

Tabela 17. Atributos químicos e valores do complexo sortivo do solo Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Horiz.	Prof (cm)	pH em água (1:2,5)	Complexo sortido (cmol _c kg ⁻¹)								COT (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	V%
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ⁺³	H+Al	CTC			
A	0-16	5,78	1,1	0,6	0,02	0,00	1,72	0,00	1,30	3,02	7,46	0,47	57,0
AB	16-30	5,15	0,3	0,2	0,02	0,00	0,52	0,35	1,90	2,42	6,39	0,40	21,5
Bt ₁	30-88	5,28	0,6	0,3	0,02	0,00	0,92	1,05	3,20	4,12	5,11	0,15	22,3
Bt ₂	83-120 ⁺	4,77	0,4	0,5	0,02	0,00	0,92	1,10	3,10	4,02	4,05	0,11	22,9

COT: carbono orgânico total; SB: soma de bases (SB= Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺); CTC = (SB + H+Al); V = 100 SB/CTC.

4.4.5 Produtividade e parâmetros tecnológicos

Foram determinados os parâmetros tecnológicos do caldo e da cana nos tratamentos avaliados em ambas as colheitas (2016 e 2017). As análises agroindustriais foram realizadas no laboratório da destilaria da Linhares Agroindustrial S.A. (LASA). Nas colheitas, para cada faixa foram delimitadas 2 sub-parcelas de 3 m² de área (referente a linha de 1,5 metro de largura, com 2 metros de comprimento). Nas canas cortadas nas sub-parcelas, os colmos, ponteiros e folhas foram pesados para cada parcela, assim determinou-se a produtividade de massa fresca.

4.4.6 Caracterização das propriedades químicas e físicas do solo

A amostragem do solo na área experimental foi realizada em três momentos distintos: no tempo zero (antes do estabelecimento dos tratamentos), um e dois anos após a instalação dos tratamentos, imediatamente após a colheita mecânica da cana planta, cana 1^a soca e 2^a soca, respectivamente.

Na coleta do tempo zero (julho 2015), com auxílio de uma pá de retroescavadeira, foi realizada a abertura de 4 trincheiras (1,30 m de largura por 1,10 m de comprimento e 1,20 m de profundidade) para a coleta de amostras de terra nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As amostras simples de terra foram coletadas em duas paredes da trincheira (Figura 33), uma referente a linha e a outra a entre-linha, constituindo uma amostra composta para cada profundidade.



Figura 33. Abertura de trincheiras, em área de cultivo de cana-de-açúcar após a colheita mecanizada da cana-planta em Linhares-ES, para caracterização química e física do solo até 100 cm de profundidade.

Na coleta realizada um ano após a instalação dos tratamentos (agosto 2016), realizou-se a abertura de mini trincheiras próximas as linhas de plantio, nas profundidades 0-5, 5-10,

10-20 e 20-40 cm. Já na coleta realizada cerca de 2 anos após a instalação do experimento (setembro de 2017), foram obtidas amostras de terras deformadas e indeformadas nas profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, como realizado no tempo zero; porém nessa coleta foi aberta uma trincheira em cada parcela experimental.

As amostras de terra, foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de diâmetro de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), e em seguida essas amostras foram submetidas as seguintes análises químicas: pH em água, fósforo assimilável, potássio e sódio trocáveis, cálcio e magnésio trocáveis, alumínio trocável e acidez potencial, de acordo com a EMBRAPA (1997).

Amostras indeformadas de solo foram coletadas julho 2015 e setembro de 2017, para a determinação da densidade do solo (DS) (Embrapa, 1997), entre os seguintes intervalos de profundidades do solo: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, nas entrelinhas de cultivo. Para o cálculo da porosidade total do solo (P) utilizou-se a seguinte equação: $P (\%) = (1 - DS/DP) \times 100$.

4.4.7 Carbono e nitrogênio no solo

Idem ao item 3.4.6.

4.4.8 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Idem ao item 3.4.7.

4.4.9 Estabilidade de agregados

Idem ao item 3.4.8.

4.4.10 Fauna do solo

Idem ao item 3.4.9.

4.4.11 Coleta de gases de efeito estufa e solo

Como um ano após a instalação do experimento: Idem ao item 3.4.10.

Após 2 anos de instalação do experimento, com diferentes níveis anuais de palha sobre a superfície do solo (0, 25, 50 e 100%) foi realizado a segunda avaliação de emissão de óxido nitroso do solo (período de 5 à 11 de setembro 2017). Essa amostragem também foi realizada conforme o item 3.4.10, contudo a fim de maximizar a emissão do gás simulou-se precipitações de 8 e 20 mm, de comum ocorrência na área experimental, dentro e logo ao lado das câmaras estáticas (Figura 34). O volume de água foi aplicado com auxílio de um regador manual, sendo 8 mm aplicado em uma única vez (logo após a adubação nitrogenada e potássica) e 20 mm de forma parcelada (em duas vezes) aplicados 1 e 3 dias após a adubação.



Figura 34. Aplicação de lâminas d'água no interior das câmaras estáticas e em área igual à da câmara, ao seu lado, em Linhares-ES, no período de coleta de gases do efeito estufa.

4.4.12 Adubação

Os tratos culturais das duas socas seguiram a rotina da usina, com a adubação de cobertura realizada sem movimentação da palha, na quantidade de 100 kg ha^{-1} de N e 120 kg ha^{-1} de K_2O , com as fontes sulfato de amônio e cloreto de potássio. Os adubos foram pesados para cada linha de plantio das parcelas do experimento e aplicados de forma manual a aproximadamente 15 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar. Nas linhas que foram instaladas as câmaras estáticas, para coleta de gases do efeito estufa (GEE), pesou-se a quantidade de adubo equivalente ao comprimento de cada câmara (30 cm).

4.4.13 Interpretação dos dados e avaliação estatística

Idem ao item 3.4.12.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Produtividade e parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar

O rendimento de colmos (em Mg ha^{-1}), na 1ª e 2ª soca da cana-de-açúcar, apresentou comportamento linear positivo com o aumento dos níveis de palha sobre a superfície do solo (Figura 35). A menor produtividade foi observada no tratamento com 0% (63 Mg ha^{-1}) de palha na 1ª soca e no tratamento com 25% (57 Mg ha^{-1}) de palha na 2ª soca. Na 1ª soca o ganho de produtividade do nível de palha de 50% em relação ao nível de 25% foi de 27,4%. O ganho de produtividade, observado na 2ª soca, no nível de 100% em relação ao nível de 0% de palha foi de 9,5%. Esse resultado reforça o efeito benéfico da conservação da umidade do solo através da manutenção da palhada sobre a superfície do solo (Anjos et al., 2017; Peres et al., 2010), o que influenciou positivamente na produtividade de colmos. A produtividade da segunda soca foi maior que a primeira.

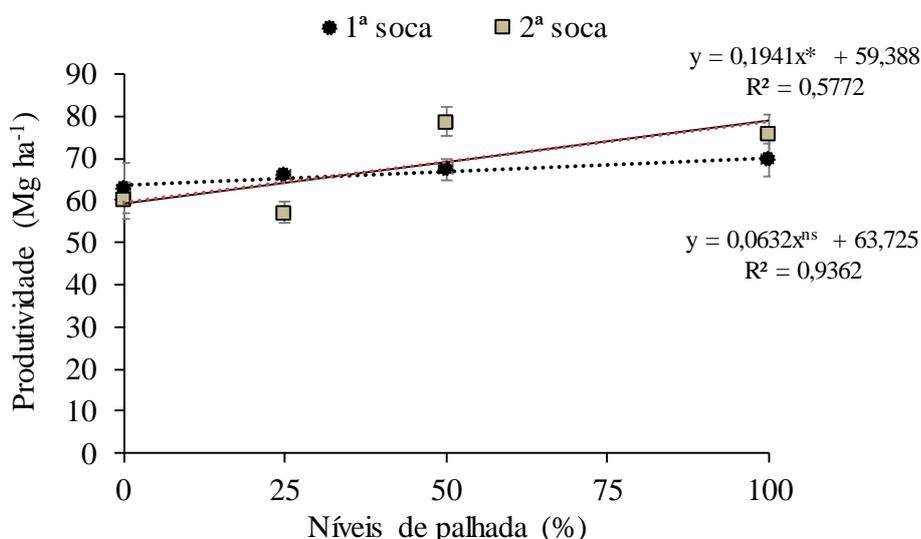


Figura 35. Produtividade de colmos frescos, da variedade de cana-de-açúcar RB-867515, um ano (1ª soca) e dois anos (2ª soca) após a instalação de experimento, com diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, em Linhares-ES. * significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo ($p > 0,01$).

Na 1ª soca, foi um período de baixos índices pluviométricos, com apenas 577,3 mm, os tratamentos apresentaram valores de produtividade similares entre si. Contudo, o tratamento 100% de palha apresentou uma média relativamente maior ($69,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), principalmente, em relação ao tratamento com remoção total da palha ($63,0 \text{ Mg ha}^{-1}$). Entretanto, na 2ª soca, a maior produtividade ($78,61 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi observada no tratamento com 50% de palha quando comparado ao 25% ($57,08 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 0% ($60,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), possivelmente devido a maior disponibilidade hídrica nesse período (1057,9 mm).

Aquino e colaboradores (2018) reforçam que o efeito benéfico da palha sobre a produtividade da cana-de-açúcar é mais pronunciado em épocas de restrição hídrica, em especial durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura (até 180 dias após o corte). Em experimento com cinco anos de duração instalado em Bandeirantes-PR, com diferentes níveis de remoção da palha da superfície de um Latossolo Vermelho Eutroférrico de textura

argilosa, esses autores, verificaram que a manutenção de 50 (10 Mg ha⁻¹) e 75 % (15 Mg ha⁻¹) de palha da cana-de-açúcar sobre o solo aumenta em até 47% a produtividade de colmos em relação aos tratamentos com 0 e 25% (5 Mg ha⁻¹) de palha, bem como, o tratamento com cana queimada. Assim, recomendam a retirada de 50% de palha para processos industriais.

Em outro trabalho de Aquino et al. (2017) na mesma área de estudo, mas avaliando a produtividade de colmos da primeira e segunda soca da cana-de-açúcar, os autores observaram que a manutenção de 50% de palha sobre o solo aumenta em até 29 % a produção em relação aos tratamentos com queima da palha, 0 e 25% de palha, e que esse efeito realmente se restringe a períodos de deficiência severa de água nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura. Porém, tais efeitos não foram observados quando havia alta disponibilidade de água no solo.

A melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, bem como o aumento de C na camada mais superficial, graças ao maior aporte de palha sobre a superfície do solo (Satiro et al., 2017; Benazzi et al., 2013; Souza et al., 2012; Sousa et al., 2012; Thorburn et al., 2012) também contribui para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar. A mineralização da palhada da cana-de-açúcar e consequente disponibilidade de nutrientes às plantas (Carvalho et al., 2017; Fortes et al., 2012) é outro fator que possivelmente influenciou positivamente na produtividade de colmos em ambas as colheitas.

4.5.2 Propriedades químicas do solo tempo zero

A caracterização química do solo, no tempo zero (antes do estabelecimento dos tratamentos), em área de cana-de-açúcar, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, pode ser observada na Tabela 18.

Tabela 18. Atributos químicos do solo Argissolo Amarelo, em área de cana-de-açúcar após a colheita de cana-planta, em Linhares-ES.

Prof. (cm)	pH (água 1:2,5)	Al ⁺³	H+Al	Ca ⁺² cmol _c kg ⁻¹	Mg ⁺² cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	Na ⁺	P mg kg ⁻¹	COT g kg ⁻¹
0-5	5,99	0,01	0,45	1,24	0,79	0,05	0,01	0,47	8,31
5-10	6,02	0,03	0,50	1,45	0,88	0,03	0,00	0,37	6,71
10-20	5,91	0,09	1,08	0,66	0,76	0,02	0,00	0,47	4,82
20-30	5,39	0,30	1,45	0,63	0,48	0,03	0,02	0,46	4,26
30-40	5,48	0,33	1,58	0,75	0,46	0,03	0,01	0,47	4,69
40-60	5,50	0,39	1,60	0,82	0,63	0,02	0,01	0,41	4,10
60-80	5,56	0,49	1,85	0,94	0,81	0,01	0,00	0,36	3,41
80-100	5,62	0,46	2,58	0,90	0,33	0,01	0,00	0,26	3,73

*Médias de 4 repetições.

4.5.3 Propriedades químicas do solo um e dois anos após a instalação do experimento

Os valores médios de pH, H+Al, Al⁺³ e Na⁺, e de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e P disponível, e o resumo da avaliação estatística dos mesmos, são apresentados nas Tabelas 19 e 20, respectivamente.

Na camada de 0-5 cm, os valores de H+Al e Ca²⁺ apresentaram ajuste quadrático, e o K⁺ ajuste linear (Figura 36A), em relação aos níveis de palha sobre o solo. Para os valores de H+Al, nessa camada, o maior e menor valor foi observado no tratamento com 50% (1,9 cmol_c kg⁻¹) e 0% (1,35 cmol_c kg⁻¹) de palha, respectivamente. O valor de Ca²⁺ também foi maior no

tratamento de 50% ($2,05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), mas os menores valores foram observados nos tratamentos com 100 ($1,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e 0% ($1,67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de palha. Já os valores de K^+ , na camada superficial, aumentaram em função dos níveis crescentes de palha, com o maior valor registrado no tratamento com 100% ($61,03 \text{ mg kg}^{-1}$) de palha, evidenciado que quanto maior a deposição de palha sobre o solo maior a disponibilização de K^+ .

Na camada de 5-10 cm, somente os valores médios de Mg^{2+} e P disponível (Figura 36B) foram influenciados significativamente pelos diferentes níveis de palha, apresentado comportamentos quadráticos. Para os valores de Mg^{2+} a aplicação de 25% de palha sobre o solo resultou em maior teor ($0,78 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), principalmente, em relação aos tratamentos com 100 e 0% de palha ($0,48$ e $0,50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente). Em relação ao P disponível na camada de 5-10 cm, o comportamento foi semelhante ao do Mg^{2+} nessa mesma camada, contudo no tratamento com 100% ($1,44 \text{ mg kg}^{-1}$) os valores apresentaram uma queda ainda mais acentuada em relação ao tratamento 25% ($4,98 \text{ mg kg}^{-1}$) de palha.

Os valores de Mg^{2+} , na camada de 10-20, também apresentaram efeito quadrático em relação aos níveis de palha, assim como os de Ca^{2+} (Figura 36C). Entretanto, os valores de Mg^{2+} foram maiores com a deposição de mais palha sobre o solo (50 e 100 %), principalmente em comparação a dose de 25%. Já os valores de Ca^{2+} a deposição de 0 e 100% de palha sobre o solo apresentaram valores semelhantes ($1,65$ e $1,70 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente), porém com a aplicação de 25 e 50 % de palha esses valores diminuíram para $1,33$ e $0,98 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente.

A camada de 20-40 cm do solo foi a que apresentou o maior número de variáveis com respostas significativas à aplicação de diferentes níveis de palha sobre o solo (Figura 36D). Nessa camada, os valores de Al^{3+} , H+Al, Ca^{2+} , Mg^{2+} e pH do solo, apresentaram comportamento quadrático em relação aos níveis de palha sobre o solo. Onde os valores de pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentaram comportamento semelhante, sendo as menores médias ($5,33$, $0,53$ e $0,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente) dessas variáveis observadas no tratamento com 50% de palha. O contrário foi observado para os valores de Al^{3+} e H+Al, que apresentaram os maiores valores nos tratamentos com 25 e 50% de palha.

Tabela 19. Valores médios de pH, acidez potencial, alumínio e sódio trocáveis, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Variáveis	Níveis de palha (%)															
	0	25	50	100	0	25	50	100	0	25	50	100	0	25	50	100
Camadas (cm)	pH (em água)				H+Al				Al ⁺³ (cmol _c kg ⁻¹)				Na ⁺			
0-5	5,68	5,59	5,40	5,76	1,35	1,80	1,90	1,50	0,09	0,05	0,11	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
5-10	5,68	5,70	5,72	5,70	1,61	1,97	1,06	1,33	0,11	0,11	0,05	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05
10-20	5,72	5,63	5,90	5,60	1,28	1,59	1,55	1,01	0,14	0,33	0,23	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06
20-40	5,92	5,81	5,33	5,78	1,40	1,98	1,83	1,06	0,10	0,20	0,40	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05
Média Geral	5,75	5,68	5,59	5,71	1,41	1,83	1,58	1,23	0,11	0,17	0,20	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06
Teste Regressão	F-RL / F-RQ			CV (%)	F-RL / F-RQ			CV (%)	F-RL / F-RQ			CV (%)	F-RL / F-RQ			CV (%)
0-5	ns			8,12	**			22,64	ns			101,84	ns			9,82
5-10	ns			8,81	ns			19,18	ns			130,75	ns			9,3
10-20	ns			8,15	ns			39,04	ns			123,45	ns			12,65
20-40	**			4,92	**			11,62	***			75,66	ns			11,24

***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = Não significativo (p > 0,10). RL e RQ: Regressão Linear e Regressão Quadrática, respectivamente

Tabela 20. Valores médios de cálcio, magnésio, e potássio trocáveis, e fósforo disponível, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Variáveis	Níveis de palha (%)															
	0	25	50	100	0	25	50	100	0	25	50	100	0	25	50	100
Camadas (cm)	Ca ²⁺				Mg ²⁺				K ⁺				P disponível			
	----- (cmol _c kg ⁻¹) -----				-----				----- (mg kg ⁻¹) -----				-----			
0-5	1,67	1,88	2,05	1,48	0,55	0,78	0,78	0,75	44,35	42,48	46,86	61,03	2,61	3,07	17,33	11,61
5-10	1,35	1,53	1,78	1,63	0,50	0,78	0,68	0,48	25,96	35,45	30,05	27,90	2,38	4,98	4,49	1,44
10-20	1,65	1,33	0,98	1,70	0,55	0,30	0,58	0,78	24,10	28,02	20,92	31,20	2,18	13,21	2,99	2,75
20-40	1,20	1,03	0,53	1,35	0,90	0,55	0,48	0,60	16,97	21,63	13,94	18,99	5,11	12,87	18,75	5,34
Média Geral	1,47	1,44	1,33	1,54	0,63	0,60	0,63	0,65	27,84	31,90	27,94	34,78	3,07	8,53	10,89	5,28
Teste Regressão	F-RL / F-RQ		CV (%)	F-RL / F-RQ		CV (%)	F-RL / F-RQ		CV (%)	F-RL / F-RQ		CV (%)	F-RL / F-RQ		CV (%)	
0-5	**		20,94	ns		42,69	*		26,31	ns		112,33				
5-10	ns		26,29	*		38,51	ns		15,93	***		39,58				
10-20	***		25,77	*		26,42	ns		16,33	ns		125,81				
20-40	**		34,42	*		32,79	ns		29,22	ns		122,39				

***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = Não significativo (p > 0,10). RL e RQ: Regressão Linear e Regressão Quadrática, respectivamente.

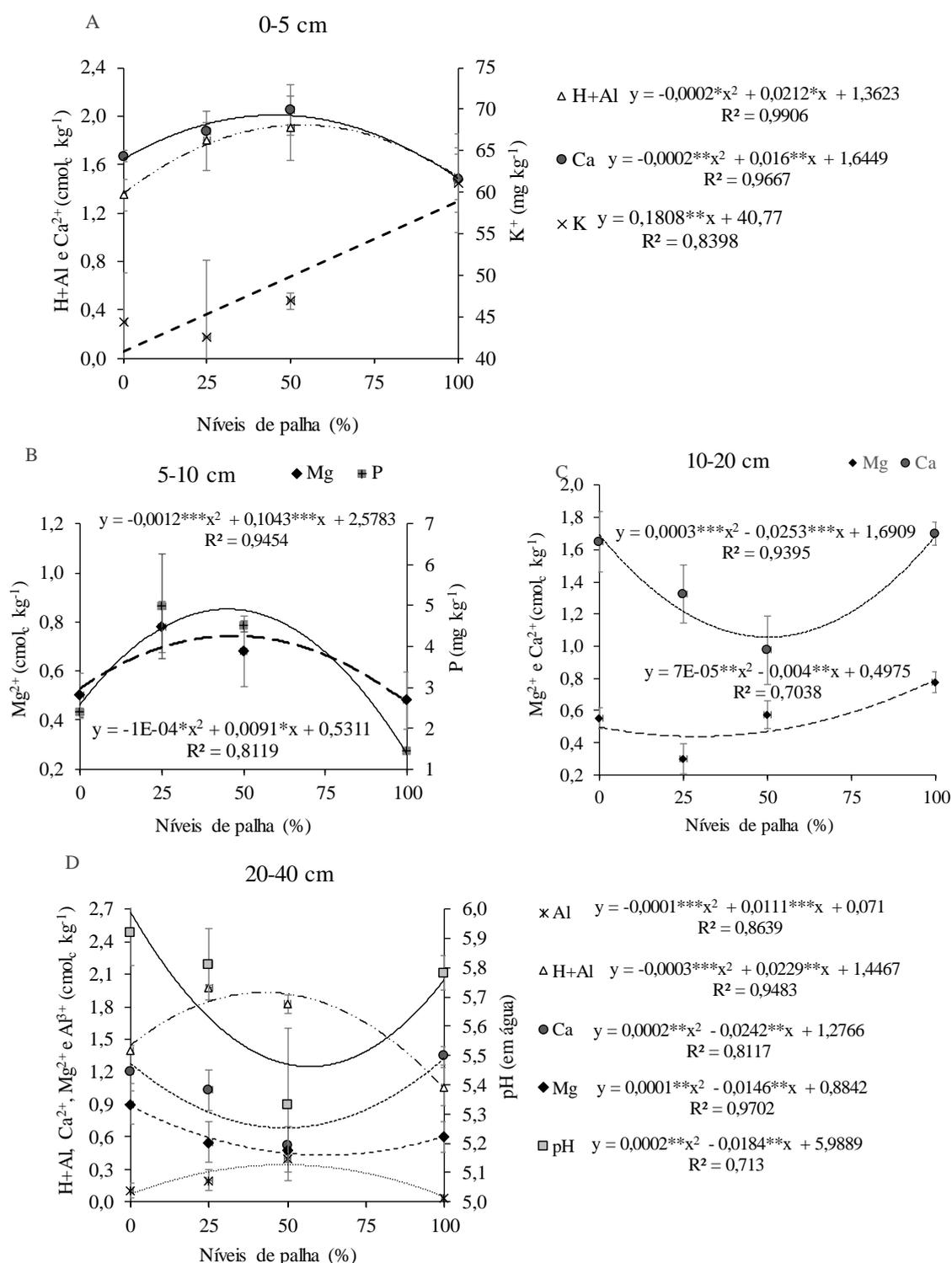


Figura 36. Atributos químicos do solo (significativamente influenciados) um ano após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em Linhares-ES. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Ao avaliar a fertilidade do solo após 2 anos de deposição de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, em 8 intervalos de profundidade: (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40,

40-60, 60-80 e 80-10 cm) (Figuras 37 e 38), observou-se nos primeiros 10 cm de profundidade do solo, efeitos significativos dos níveis de palha sobre os valores médios de Ca^{2+} , Mg^{2+} , H+Al e P.

Para os níveis de Ca^{2+} na camada 5-10 cm, observou-se o aumento linear das médias de acordo com o aumento dos níveis de palha sobre o solo, onde a manutenção de 100% de palha apresentou média 44% maior que o tratamento de 0% de palha (Figura 37 A). Os maiores valores de Mg^{2+} também foram observados no tratamento com manutenção de 100% de palha, mas o menor valor foi encontrado no tratamento com 25% de palha (Figura 37 B).

Nas camadas de 60-80 e 40-60 cm, os níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} , respectivamente, apresentaram comportamento quadrático significativo para às crescentes deposições de palha sobre a superfície do solo. Os menores valores foram observados nos tratamentos com 0% de palha (0,99; 056, respectivamente) em relação principalmente aos tratamentos com 25 e 50% de palha (1,44 e 1,39; 0,93 e 0,91, respectivamente).

Para os valores de acidez potencial os efeitos significativos da palha ocorrem somente nas camadas de 0-5 cm e na camada de 20-30 cm, apresentando comportamento quadrático. Onde os maiores valores foram verificados nos tratamentos com deposição de 25 e 50 % de palha (1,97 e 1,80, respectivamente na camada de 0- 5 cm; e de 2,01 e 1,84, respectivamente na camada de 20-30 cm) em relação aos com 100 e 0% de palha. Esse mesmo comportamento foi observado no primeiro ano de avaliação desse estudo (Figura 36 A e D).

Os valores médios dos teores de P na camada de 0-5 cm também apresentaram comportamento quadrático significativo em relação aos níveis de palha, A distribuição do teor de P em profundidade nos tratamentos avaliados pode ser observado na Figura 38D. Observou-se a maior média no tratamento com deposição de 50% de palha (7,02 mg kg⁻¹), sendo, aproximadamente, 62% maior que o valor médio observado no tratamento com remoção de toda palha (2,61 mg kg⁻¹).

O outro atributo do solo que apresentou efeito significativo linear negativo dos níveis de palha foi o pH do solo, mas somente na camada de 30-40 cm (37 D), com o menor valor observado no tratamento de 100% de deposição de palha (5,37) em comparação ao com 25% de deposição (5,64). As demais variáveis avaliadas, o Al^{3+} , Na^+ e K^+ (Figura 37 C, 38 B e C, respectivamente) referentes a fertilidade do solo, não apresentaram efeito significativo dos níveis de palha, nas diferentes camadas amostradas.

A manutenção da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo geralmente melhora os atributos químicos do mesmo. Em experimento conduzido em Latossolo Vermelho Distrófico, textura média, em Paraguaçu Paulista-SP, Souza et al. (2012) observaram, na camada de 0-20 cm, em sistema sem queima por seis anos maiores teores de C, pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , P e K^+ , e menores teores de Al^{+3} e H+Al, quando comparado a área com queima da palhada, ao longo de 16 anos.

Em experimento com tratamentos com e sem queima da palhada ao longo de 55 anos, em Cambissolo Háplico, localizado no município de Campos dos Goytacazes-RJ, Canellas et al. (2003) observaram diminuição dos valores de pH, C, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , N, T, V%, Fe, Cu, Zn e Mn no solo até a profundidade de 40 cm, sob colheita com queima da palhada, corroborando em grande parte com os resultados encontrados por Souza et al. (2012).

O efeito positivo da deposição da palha da cana-de-açúcar sobre a fertilidade do solo tem sido apontado em alguns trabalhos (Satiro et al., 2017; Souza et al., 2012; Canellas et al., 2003; Mendonza et al., 2000). Contudo, geralmente os efeitos mais perceptíveis se restringem as camadas mais superficiais do solo, dependendo ainda das condições climáticas, da textura do solo e do tempo de deposição da palhada sobre a superfície do solo (Satiro et al., 2017; Thorburn et al., 2012).

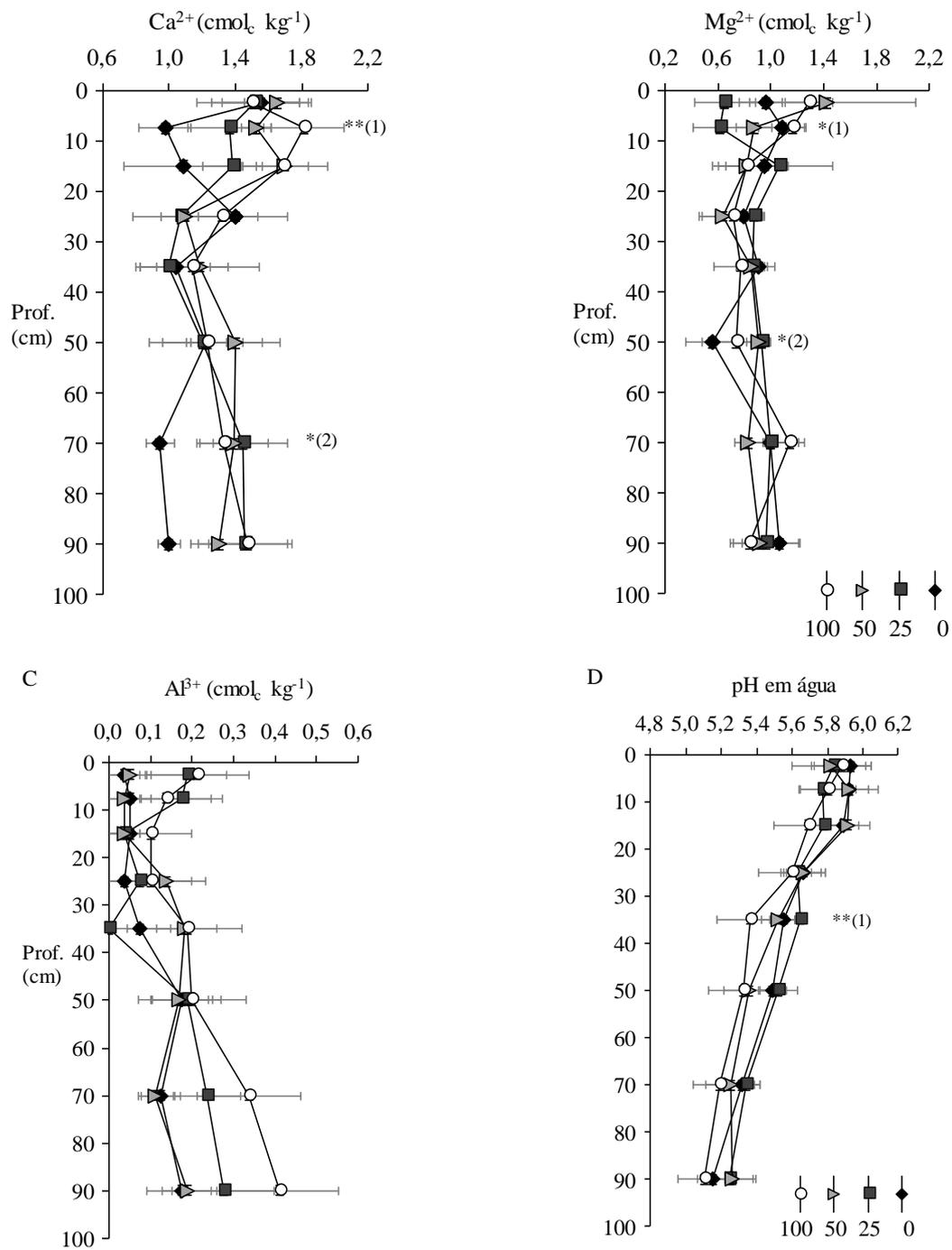


Figura 37. Valores médios de cálcio (A), magnésio (B), e alumínio trocáveis (C), e pH em água (D), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = 0,007877x + 1,0735$, $r^2 = 0,93$; ⁽²⁾ $y = -0,000133x^2 + 0,016494x + 0,9883$, $r^2 = 0,83$. B: ⁽¹⁾ $y = 0,000145x^2 - 0,012812x + 1,02009$, $r^2 = 0,72$; ⁽²⁾ $y = -0,000123x^2 + 0,013685x + 0,58925$, $r^2 = 0,88$. D: ⁽¹⁾ $y = -0,002294x + 5,621$, $r^2 = 0,715$. ***, ** e * Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Ao avaliar o efeito da deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar, em dois solos distintos, Latossolo Vermelho distrófico típico (Capivari-SP) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (Valparaíso-SP), sobre os atributos químicos dos mesmos, Satiro et al. (2017) verificaram efeitos significativos apenas em Argissolo (textura mais arenosa). Os efeitos se restringiram ainda a camada mais superficial (0-2,5 cm) e aos valores dos teores de Ca e Mg. Os valores de Ca e Mg foram 40 e 60%, menores, respectivamente, quando a palhada foi totalmente removida quando comparada ao tratamento com manutenção de 100% de palha ($13,2 \text{ Mg ha}^{-1}$).

O efeito positivo da deposição da palha sobre os atributos químicos do solo se deve, principalmente, ao fornecimento de nutrientes via decomposição dessa palha, a qual possui maior concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, principalmente, nos ponteiros verdes do que das folhas secas, e valores semelhantes de cálcio, magnésio e enxofre, entre essas partes. O conteúdo de macronutrientes na palhada varia ainda de acordo com a variedade de cana-de-açúcar, ciclo da cultura e local de cultivo da mesma (Menandro et al., 2017). De acordo com de Oliveira et al. (2002), os teores gerais de macronutrientes na palhada da cana são: nitrogênio (0,46 – 0,54%), potássio (0,47 – 0,66%), magnésio (0,09 – 0,17%); cálcio (0,18 – 0,41%); enxofre (0,06 – 0,17%); fósforo (0,05 – 0,09%).

Assim, além do fornecimento de nutrientes via decomposição da palhada, a manutenção de palhada sobre a superfície do solo também diminui as perdas de nutrientes por lixiviação e erosão hídrica, pois protege a camada superficial do solo do impacto direto da gota da chuva (Sousa et al., 2012; Andrade et al., 2011) e aumenta a capacidade de retenção de cátions no solo devido ao aumento de matéria orgânica do solo (Satiro et al., 2017; Thorburn et al., 2012; Pinheiro et al., 2010; Galdos et al., 2009).

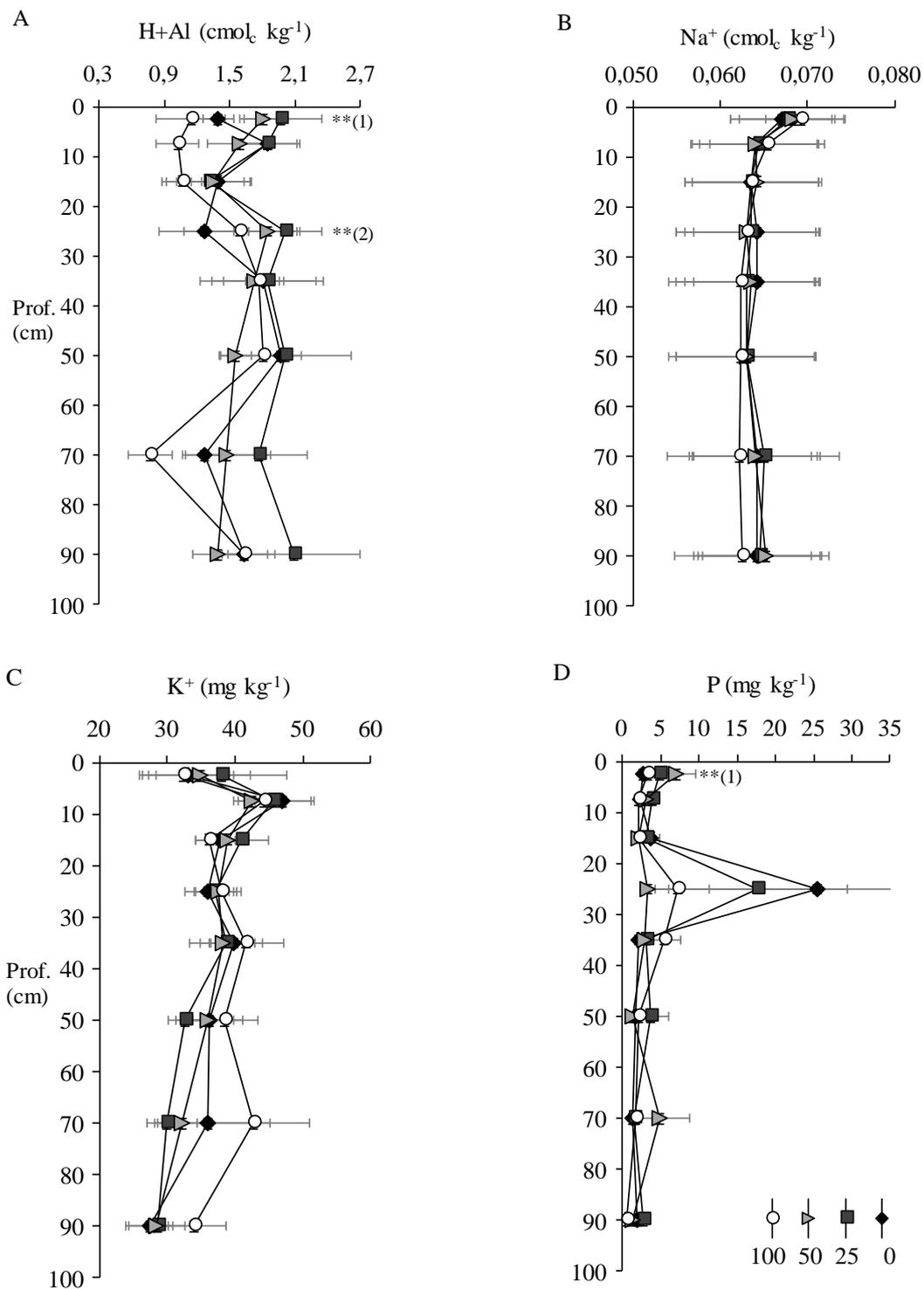


Figura 38. Valores acidez potencial (A), sódio (B) e potássio (C) trocáveis, e fósforo assimilável (D), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100cm, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Análise de regressão significativas: A: ⁽¹⁾ $y = -0,000249x^2 + 0,021735x + 1,44175$ $r^2 = 0,92$; ⁽²⁾ $y = -0,000217x^2 + 0,02393x + 1,3445$, $r^2 = 0,77$. D: ⁽¹⁾ $y = -0,001475x^2 + 0,15754x + 2,3775$ $r^2 = 0,94$. ** Significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

4.5.4 Carbono e nitrogênio no solo

Os valores de carbono orgânico do solo nas camadas de 0-5 e 30-40 cm, foram influenciados significativamente pelos níveis de palha sobre a superfície do solo, apresentando comportamento quadrático (Figura 39 A), após 2 anos de instalação do experimento. Contudo, em termos numéricos o resultado da camada mais superficial chama mais atenção, onde a deposição dos maiores níveis de palha 50 e 100 % apresentaram valores de C 36 e 22 % maiores ao valor observado no tratamento com remoção total da palha (16,51 g kg⁻¹).

Esse resultado corrobora com diversos estudos que têm verificado o aumento e/ou manutenção do C no solo devido a conservação de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo (Satiro et al., 2017, Thorburn et al., 2012; Pinheiro et al., 2010; Galdos et al., 2009).

Embora não tenha sido observada influência significativa dos níveis de palha sobre os teores de nitrogênio do solo na camada de 0-5, observou-se menores valores no tratamento com 100% de palha principalmente em relação ao tratamento com 50% de palha (Figura 39 B). O que reforça que, possivelmente, parte do N aplicado no solo foi imobilizado por microrganismos do solo devido à alta relação C:N da palha (Robertson e Thorburn, 2007).

Já na camada de 40-60 cm, também observou-se efeito significativo dos níveis de palha sobre o conteúdo de N no solo, onde os maiores valores de N foram observados nos tratamentos com maiores deposições de palha (1,82 e 1,63 g kg⁻¹, para os tratamentos com 100 e 50% de palha, respectivamente) quando comparados ao tratamento sem palha (1,08 g kg⁻¹). Nas camadas de 20-30 e 30-40 cm verificou-se comportamento semelhante ao da camada de 40-60 cm, contudo não foram estatisticamente significativos. O que sugere um efeito benéfico na manutenção da palha sobre os teores de N do solo em subsuperfície, possivelmente, graças a ciclagem de N da palhada da cana-de-açúcar (Trivelin et al., 2013; Basanta et al., 2003).

Em estudo, com diferentes quantidades de manutenção de palha da cana-de-açúcar sobre o solo (0, 25, 50, 75 e 100%, com aporte de 0, 2,8, 5,7, 8,5 e 11,3 Mg ha⁻¹, respectivamente), Ramos et al. (2016) observaram em termos absolutos maiores quantidades de C e N mineralizados sob condições de menor retirada de palha. O que comprova o potencial da palha em aumentar o aporte de C e N do solo, o que contribui na mitigação dos gases do efeito estufa (GEE) (Jiang et al., 2017).

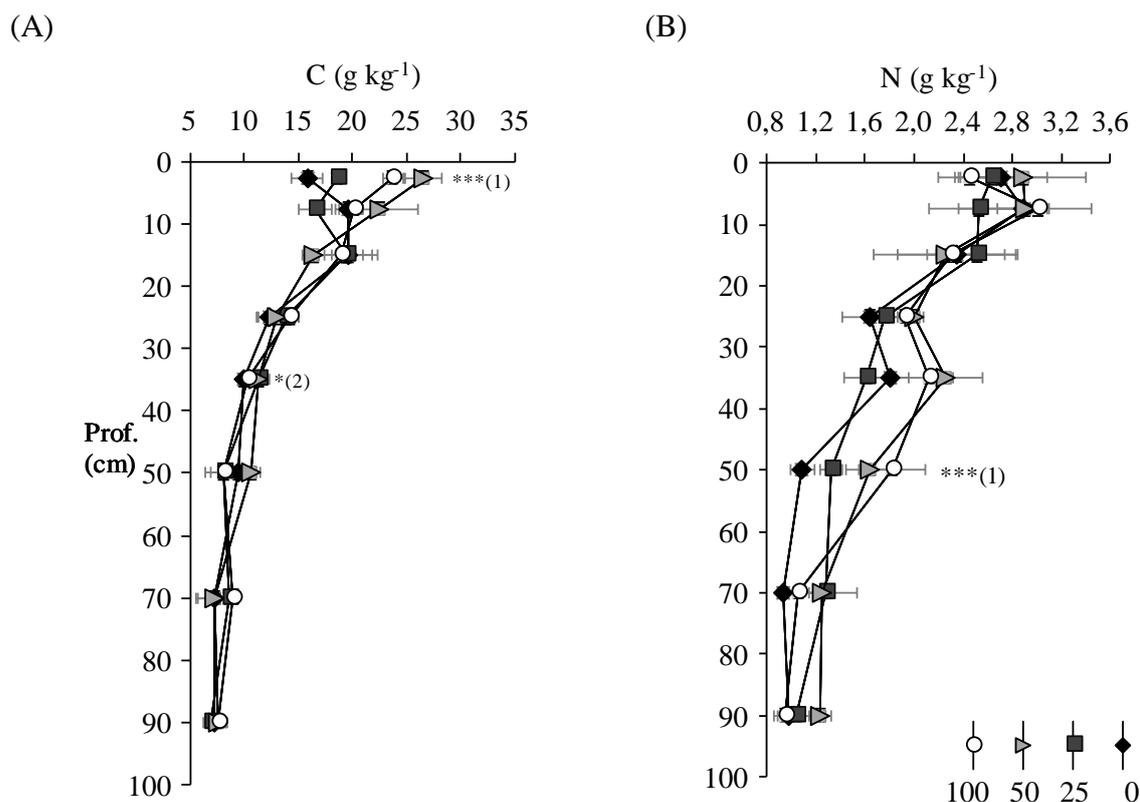


Figura 39. Distribuição do teor de carbono orgânico (A) e nitrogênio total (B) em profundidade no solo, em área de cana-de-açúcar, avaliada dois anos após a deposição de diferentes níveis de palha sobre a superfície de Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

Camadas do solo: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm; **A:** $(1) y = -0,00211x^2 + 0,30263x + 14,895$ $r^2 = 85,21$; $(2) y = -0,00053x^2 + 0,054x + 10,06$, $r^2 = 0,97$; **B:** $(1) y = 0,00737x + 1,1425$, $r^2 = 0,93$; ***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

4.5.5 Caracterização das propriedades físicas do solo antes da implantação do experimento

Os valores de areia, argila e silte, no tempo zero (antes do estabelecimento dos tratamentos), nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, podem ser visualizados na Tabela 21. De maneira geral, a fração que predomina em todas as camadas avaliadas é a areia, com valores de no mínimo 67% e no máximo de 88%, os valores de silte são menores que 6%. Em profundidade, da superfície até 100 cm de profundidade, observou-se que os valores de argila aumentam ao mesmo tempo que os teores de areia diminuem.

Tabela 21. Atributos físicos do solo em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente (sem queima), no tempo zero (antes da instalação do experimento), em Linhares-ES

Prof. (cm)	Ds	Dp	PT	Areia	Argila	Silte
 Mg m ⁻³					
0-5	1,52	2,43	38	87	8	5
5-10	1,62	2,44	34	88	10	2
10-20	1,62	2,52	36	87	9	4
20-30	1,67	2,44	31	85	12	3
30-40	1,67	2,19	24	71	21	8
40-60	1,60	2,42	34	68	24	8
60-80	1,56	2,38	34	67	28	6
80-100	1,54	2,39	36	68	23	9
Média Geral	1,60	2,40	33	78	17	5

*Médias de 4 repetições. Ds: densidade do solo; Dp: densidade da partícula; PT: porosidade total do solo.

4.5.6 Porosidade total e densidade do solo

O principal efeito da aplicação de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre o solo nos atributos físicos do mesmo, dois anos após a instalação do experimento, foi mais pronunciado nos primeiros 5 cm de profundidade. Os maiores níveis de palha (100 e 50%) diminuíram a densidade do solo (Figura 40 A) e conseqüentemente, aumentaram a porosidade total (Figura 40 B), em relação ao tratamento com 25% e 0% de palha. O tratamento com 100% de palhada foi estatisticamente superior aos demais quanto a DS e a porosidade do solo.

A cobertura do solo com resíduos vegetais, oriundos da colheita mecânica da cana crua, reduz os efeitos negativos que a colheita mecânica causa sobre os atributos físicos do solo (Garbiate et al., 2011). Esses autores observaram em área com colheita mecânica (com e sem queima) e colheita manual (com queima), em Latossolo Vermelho distrófico de textura média, que a colheita mecânica resulta em aumento da densidade do solo, diminuição da estabilidade de agregados. Contudo, quando a colheita mecânica é realizada, mas com manutenção da palha o efeito da compactação é amenizado em relação a área com queima.

A densidade e porosidade total do solo (0-5 cm) observadas no tratamento com 100% (1,22 Mg m⁻³, 49,9%, respectivamente) (Figura 40 A e B, respectivamente) de manutenção da palha foi 15% e 18% mais baixa e alta, respectivamente, que as médias do tratamento com remoção total da palha (1,44 Mg m⁻³ e 40,9%, respectivamente). A maior quantidade de palha (100%) sobre o solo o protege do impacto direto da gota da chuva, o que não ocorre quando a palha é totalmente removida (0%), causando selamento superficial do solo (Sousa et al., 2012).

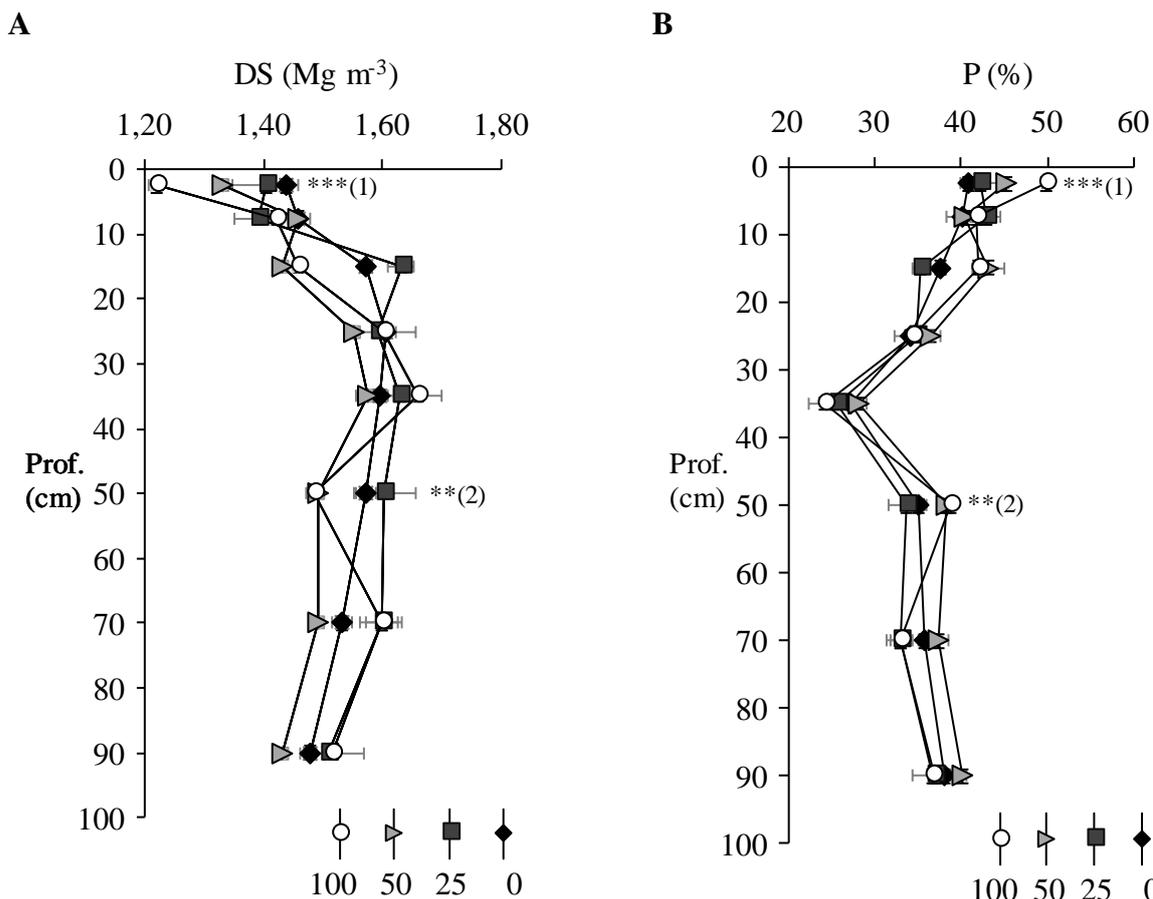


Figura 40. Valores médios de densidade do solo (DS) (A) e porosidade total (P) (B), avaliados dois anos após a instalação de diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES

A: ⁽¹⁾ $y = -0,0023x^{***} + 1,446$, $r^2 = 0,99$; ⁽²⁾ $y = -0,00112x^{**} + 1,5865$, $r^2 = 0,65$; B: ⁽¹⁾ $y = 0,0928x^{***} + 40,52$, $r^2 = 0,99$; ⁽²⁾ $y = 0,0458x^{**} + 34,47$, $r^2 = 0,64$,***, ** e * significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Esse resultado também corrobora com os encontrados por Satiro et al. (2017), os quais também verificaram aumento da densidade e resistência do solo à penetração com o aumento da remoção de palha, nas camadas superficiais de um Latossolo Vermelho distrófico típico (textura franco-argilo-arenosa), situado em Capivari-SP.

Entretanto, os atributos físicos do solo também são influenciados por outros fatores como as condições edafoclimáticas de cada área (Satiro et al., 2017), tempo de cultivo (Filho Vischi et al., 2016), e ainda umidade do solo no momento da colheita mecânica (Torres et al., 2016; Rosim et al., 2012; Souza et al., 2012). No mesmo estudo realizado por Satiro e colaboradores, mas em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (textura franco-arenosa), em Valparaíso-SP, os mesmos autores não encontraram efeito significativo dos níveis de remoção da palhada da cana-de-açúcar sobre a densidade, umidade e resistência do solo à penetração, nas camadas avaliadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm).

A compactação dos solos em áreas com produção de cana-de-açúcar tem se tornando cada vez mais frequente em razão da colheita mecânica e do trânsito do transbordo, a qual se agrava com os anos de cultivo (Filho Vischi et al., 2016; Torres et al., 2016). Assim, nessas

condições de estudo não se recomenda a remoção de palha para produção de álcool de segunda geração e/ou energia visto que, a maior manutenção de palha influencia positivamente na qualidade física do solo, sendo maior na camada superficial do solo.

O aumento dos valores médios de densidade do solo e diminuição dos valores de porosidade total do solo, entre a profundidade de 10 a 40 cm, são devido ao incremento natural de argila que ocorre em subsuperfície (Tabela 13), típico dessa ordem de solo (Argissolo), provavelmente, também contribuiu para esse resultado.

Além disso, outro possível motivo é a compactação do solo causada pela colheita mecânica. Diversos estudos têm relatado o efeito negativo da colheita mecânica sobre os atributos físicos do solo, principalmente na camada de 20-40 cm (Torres et al., 2013; Roque et al., 2010; Souza et al., 2005; Wood, 1991), o que causa aumento na resistência do solo à penetração com prejuízos na dinâmica da água, de nutrientes e no crescimento das raízes (Letey, 1985), repercutindo negativamente na produtividade dos canaviais.

4.5.7 Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo

Com relação ao manejo dos diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar sobre o aporte de fração leve da matéria orgânica do solo (g kg^{-1}) (Figura 41), observa-se que os valores de FLL ($7,99 \text{ g kg}^{-1}$) foram maiores que os de FLI ($1,98 \text{ g kg}^{-1}$), em ambas as camadas (0-5 e 5-10 cm), características de solos de textura mais leve.

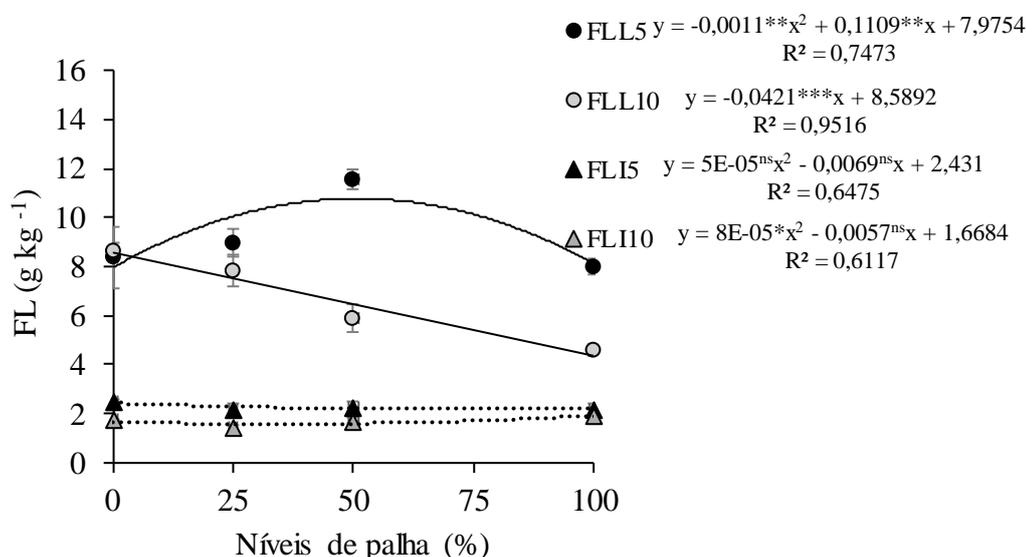


Figura 41. Frações leves da matéria orgânica do solo (FL) na camada de 0-5 cm (FLL5 e FLI5) e na de 5-10 cm (FLL10 e FLI10), avaliadas um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES

FLL10= fração leve livre na camada de 5-10 cm, FLI5= fração leve livre intra-agregado na camada de 0-5 cm e FLI10= fração leve livre intra-agregado na camada de 5-10 cm. *, ** e *** Significativo a 0,01, 0,05 e 0,10 de probabilidade pelo teste t, respectivamente; ns = não significativo ($p > 0,10$).

A FLL, na camada 0-5 cm, apresentou modelo quadrático em função dos níveis de palha, onde o tratamento com deposição de 50% de palha apresentou a maior massa ($11,59 \text{ g kg}^{-1}$) seguido por 25% ($8,99 \text{ g kg}^{-1}$), 0% ($8,38 \text{ g kg}^{-1}$) e 100% ($7,99 \text{ g kg}^{-1}$), respectivamente. Já na profundidade de 5-10 cm, o comportamento observado foi linear negativo em função

dos níveis de palha, onde o menor aporte de FLL foi observado no tratamento com 100% de palha (4,61), ou seja, aproximadamente 47% menor que o aporte observado no tratamento sem deposição de palha sobre o solo (4,61).

Em relação a fração leve intra-agregado (FLI), essa não foi influenciada significativamente pelos diferentes níveis de palha, em ambas camadas avaliadas (Figura 41). Contudo, em média, os valores de FLI na camada de 0-5 cm foram 26% maiores que os valores observados na camada de 5-10 cm, o que evidencia que os maiores aportes de fração leve são observados na camada mais superficial do solo (0-5 cm). Em curto prazo, o efeito dos níveis de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície foi observado somente para a fração leve livre (FLL) que é amplamente considerada na literatura (Zhao et al., 2016; Pinheiro et al., 2004; Carter, 2001) como indicadora de qualidade do solo

4.5.8 Agregação do solo

O diâmetro médio dos agregados do solo (mm), na camada de 0-10 cm do solo, foi influenciado significativamente pelos diferentes níveis de palha sobre o solo, apresentado comportamento quadrático (Figura 42). A maior agregação do solo foi observada no tratamento com deposição de 50 % de palha (4,22) e a menor nos tratamentos com 0% (3,43) e principalmente 100 % de palha (2,02).

A diminuição do DMP dos agregados no tratamento com 100% de palha não é comum. A maioria dos estudos em sistemas de cultivo da cana-de-açúcar têm verificado aumento do DMP em condições em que a palha da cana-de-açúcar é mantida sobre a superfície do solo (Ceddia et al., 1999). A capacidade de agregação desse solo é muito baixa devido a textura arenosa. Sendo a matéria orgânica do solo o principal agente cimentante que atua na agregação das partículas desse solo (Pinheiro, 2007). Assim, a ausência de aporte contínuo de resíduos vegetais ao solo pode resultar em uma estabilidade de agregados ainda menor (Primavesi, 2006).

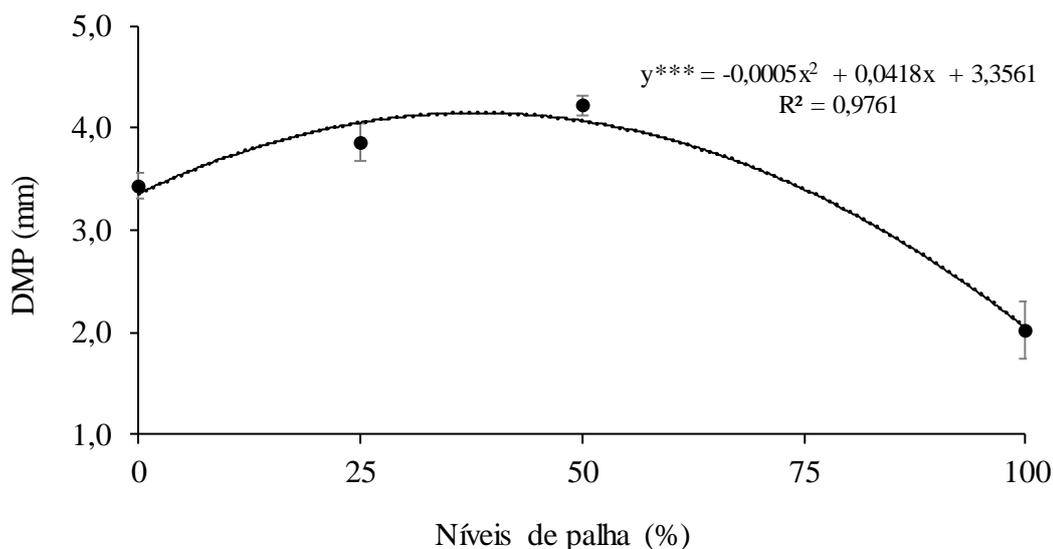


Figura 42. Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), na camada de 0-10 cm, avaliados um ano (1ª soca) após a instalação de diferentes níveis de palha sobre a superfície do solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. *** Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste t, ns = não significativo.

O teor de carbono orgânico do solo está intimamente associado à formação de agregados no solo, em especial à formação de macroagregados (John et al., 2005; Six et al., 2002). O processo de agregação do solo é dinâmico, sendo necessário o aporte contínuo de resíduos vegetais para manter uma estrutura adequada ao desenvolvimento das plantas (Wendling et al., 2005). Os estudos de Arruda et al. (2015), Vicente et al. (2012) e Oliveira et al. (2010), observaram correlação significativa positiva dos teores de C do solo com sua agregação.

4.5.9 Emissão de óxido nitroso

Os fluxos de N_2O , no primeiro ano de avaliação, sob diferentes níveis e manejo da palhada (Figura 43 A) foram maiores nos tratamentos com 25% em relação aos demais tratamentos antes e nos dias 1, 2 e 5 após a adubação nitrogenada (100 kg ha^{-1} de N – sulfato de amônio). Contudo, mesmo no tratamento com maior fluxo nos dias avaliados (25%) o valor de emissão acumulada foi de $28,12 \text{ g N}_2\text{O ha}^{-1}$ (Figura 43 B), sendo considerado baixo.

A baixa emissão de N_2O observada no período de avaliação desse estudo, possivelmente se deve aos baixos valores de espaço poroso saturado por água (EPSA) (Figura 45), com média de 15,3 %, impedindo que boa parte do adubo aplicado sob os níveis de palha fosse solubilizado. Assim, a maior emissão observada no tratamento 25% possivelmente se deve a menor quantidade de palha sob a superfície do solo favorecendo o contato adubo-solo, o que não ocorreu nos tratamentos com maiores níveis de palha (50%, 100%), pois nessas condições é necessária uma lâmina de chuva que solubilize e proporcione a penetração do adubo no solo. Esse efeito de diminuição do contato adubo-solo é comprovado pelos teores de nitrogênio na forma de amônio (NH_4^+), os quais foram mais baixos nos tratamentos com 50 e 100% ($775,5$ e $82,1 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) até 3 dias após a adubação nitrogenada.

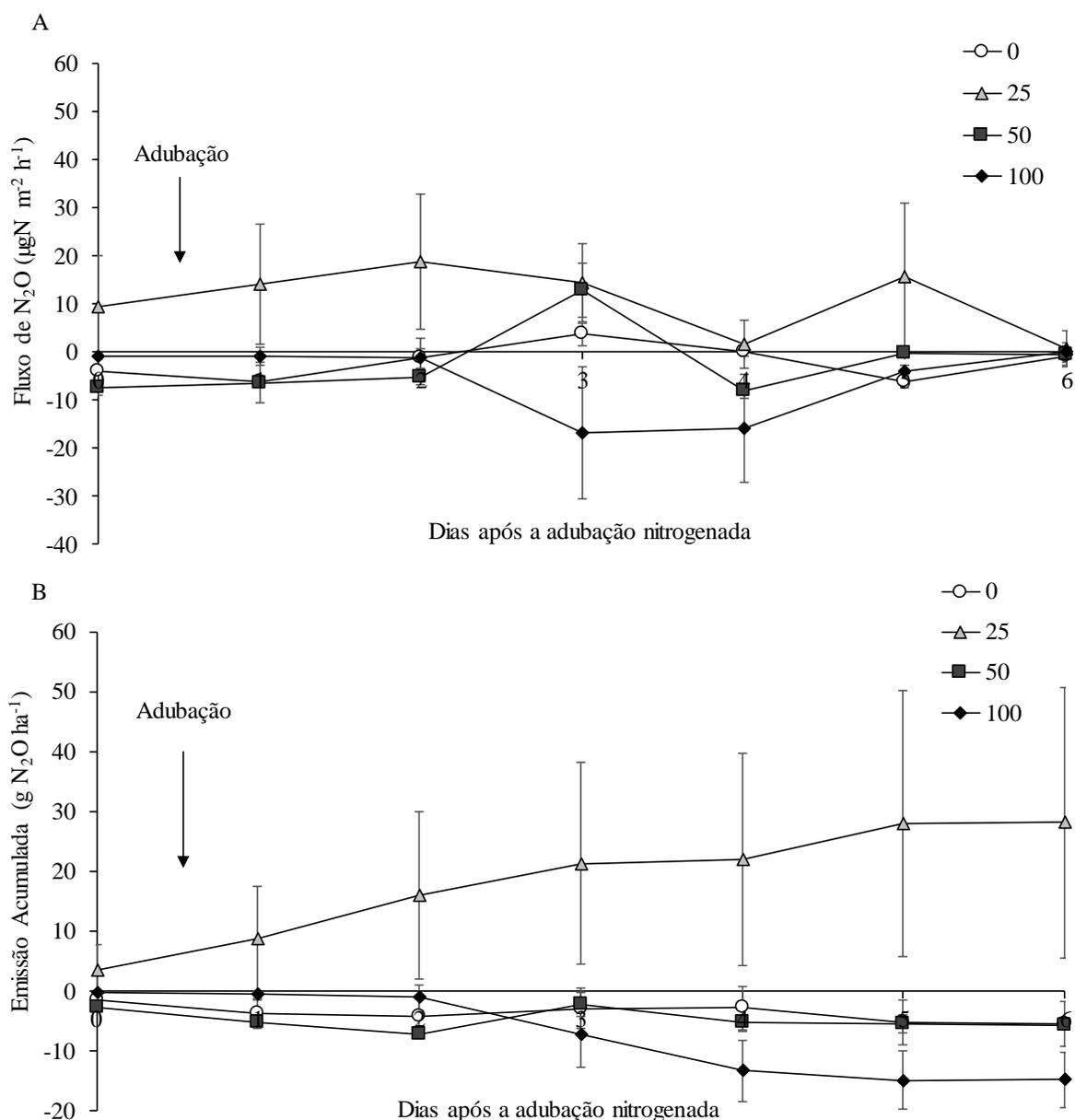


Figura 43. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N₂O, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha⁻¹, fonte: sulfato de amônio).

O aumento de NO₃⁻ observado apenas no último dia de avaliação (6 dias após a adubação) provavelmente se deve a maior solubilização do adubo, graças a uma lâmina de chuva de 15 mm registrada 6 dias após a adubação (Figura 45).

Os baixos valores de nitrato no solo (NO₃⁻) (Figura 44 B) são condizentes com os valores baixos de fluxos de N₂O, pois o processo de desnitrificação no solo ocorre de forma mais expressiva quando os valores de NO₃⁻ e EPSA são mais elevados (Martins et al., 2015; Jantalia et al., 2008). Os maiores fluxos de óxido nitroso do solo são observados em condições de EPSA com valores superiores a 80% (Baggs et al., 2003).

A remoção de 100% de palha (12,0 Mg ha⁻¹) do solo pode resultar em emissões acumuladas de N₂O de até 28% mais baixas em relação aos tratamentos que mantém a palha

sobre a superfície do solo (Vasconcelos et al., 2018). Esses autores ao avaliarem o balanço entre as emissões de gases (CO_2 , CH_4 e N_2O) pelo processo de decomposição do solo e da palha com a entrada de C no solo, em CO_2 equivalente, e concluíram que a quantidade mais adequada de manutenção de palha no sistema de produção da cana-de-açúcar nas condições do referido estudo foi de 50% ($6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$). E que é necessário o aporte de pelo menos $3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha para zerar as perdas de C que ocorrem no sistema.

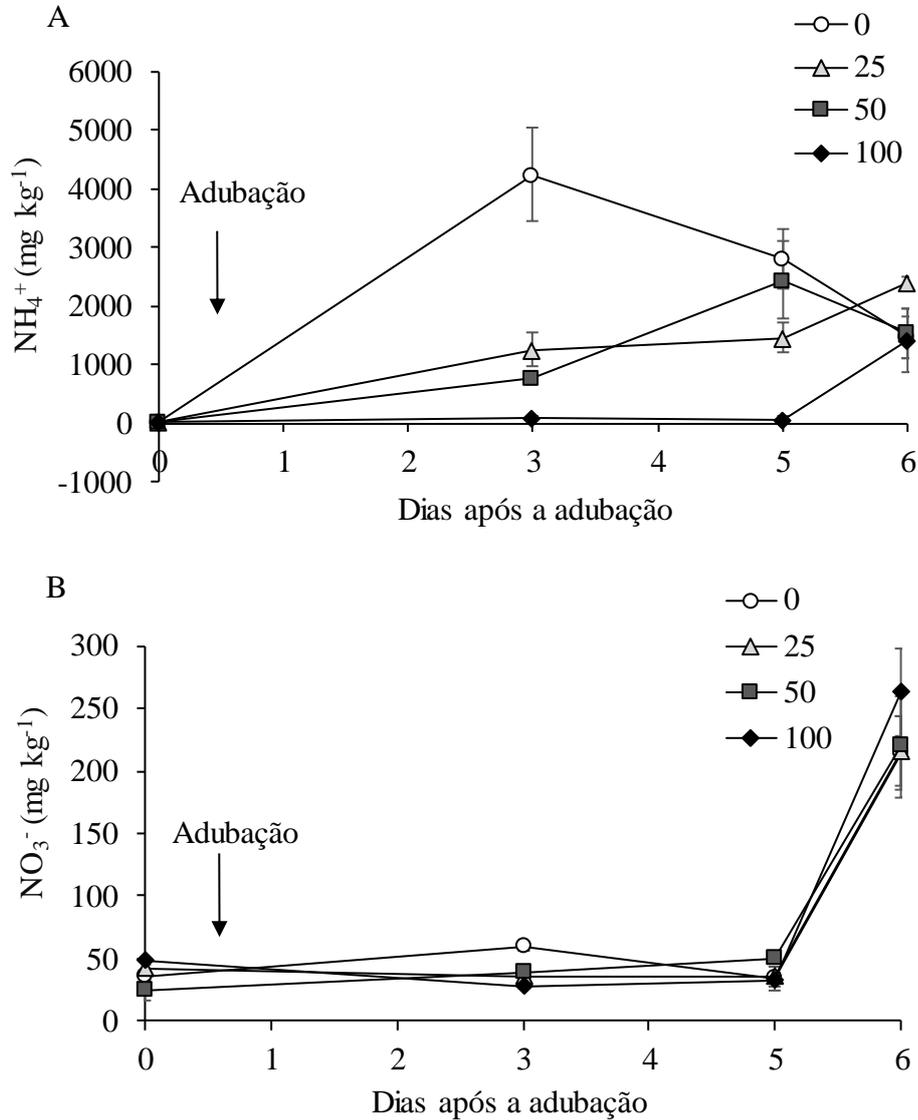


Figura 44. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha^{-1} , fonte: sulfato de amônio).

Acredita-se que o período restrito de coleta de óxido nitroso, em dias de baixas precipitações em solo com baixa capacidade de retenção de água foram os principais fatores responsáveis pelos baixos fluxos observados. Assim, as amostragens em dias de maiores precipitações, possivelmente, resultariam em fluxos mais elevados.

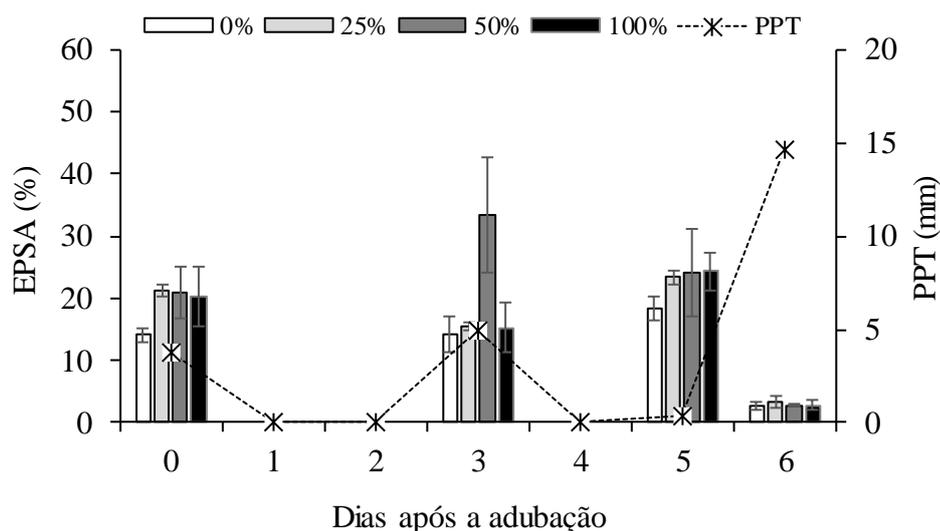


Figura 45. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, um ano após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES.

No segundo ano de avaliação, com intuito de potencializar a emissão de óxido nitroso do solo e avaliar o efeito dos níveis de palha sobre a superfície do solo em condições de EPSA mais elevado, aplicou-se lâminas d'água sobre as câmaras estáticas e do seu lado (local de amostragem de solo para análise de N mineral, densidade e EPSA do solo). Visto que nas condições desse estudo, logo após a adubação nitrogenada, a incidência de chuva geralmente é baixa.

As lâminas aplicadas foram de 8, 20 e 20 mm, aos 0, 1 e 3 dias após a adubação, respectivamente. O que aumentou os fluxos de N_2O , no tratamento com remoção total da palha dentro da câmara estática, em comparação aos demais níveis de palhada. Esse resultado sugere que a maior superfície exposta do solo influenciou positivamente nos fluxos de N_2O .

Os maiores fluxos de N_2O foram observados 3 dias após a adubação nitrogenada onde os tratamentos com 0% de palha ($151,6 \mu\text{g de N m}^{-2}\text{h}^{-1}$) apresentou o maior valor em comparação aos tratamentos com 25, 50 e 100% de palha ($-40,9$, $-76,1$ e $-28,7 \mu\text{g de N m}^{-2}\text{h}^{-1}$, respectivamente) (Figura 46A). O processo microbiológico majoritário na emissão de N_2O foi o de nitrificação visto que o EPSA (Figura 48) registrado nesse dia no tratamento de 0% de palha foi de aproximadamente 35%. O que justifica os baixos valores de N_2O emitidos, pois as maiores emissões ocorrem no processo de desnitrificação e para tal o EPSA deve ser maior ou igual a 70% (Baterman e Baggs, 2005).

Mesmo com a aplicação de lâminas d'água no segundo ano de avaliação da emissão de óxido nitroso do solo, e no primeiro ano (período de seca), observou-se fluxos de N_2O (46 A e 43 A, respectivamente) muitos baixos e até negativos (Influxo). Esse resultado é comum em períodos de seca (Carvalho et al., 2013; Metay et al., 2007).

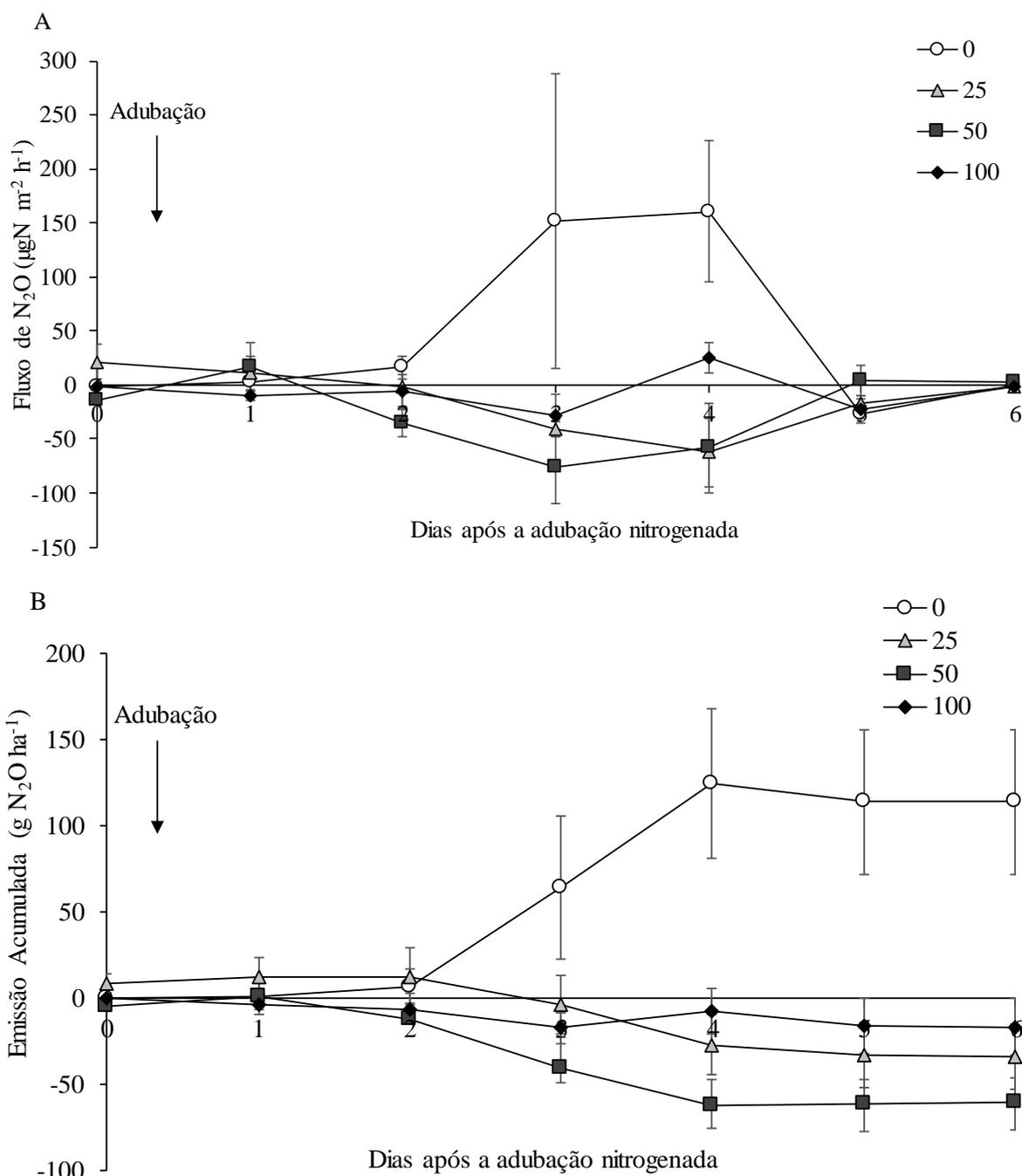


Figura 46. Fluxo (A) e emissões acumuladas (B) de N₂O, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha⁻¹, fonte: sulfato de amônio).

Em relação aos valores de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) (Figura 47 A e B, respectivamente) do solo, imediatamente antes e após a adubação nitrogenada, observa-se que os mesmos foram influenciados pelos níveis de palha sobre o solo.

Os altos teores de amônio 1, 3 e 5 dias após a adubação se devem a solubilização do adubo sulfato de amônio, aumentando a concentração do mesmo no solo. Os maiores teores de NH₄⁺ um dia após a adubação no tratamento com 0% de palha em relação aos demais se deve à ausência de palha, que favoreceu o contato direto entre o solo e o adubo.

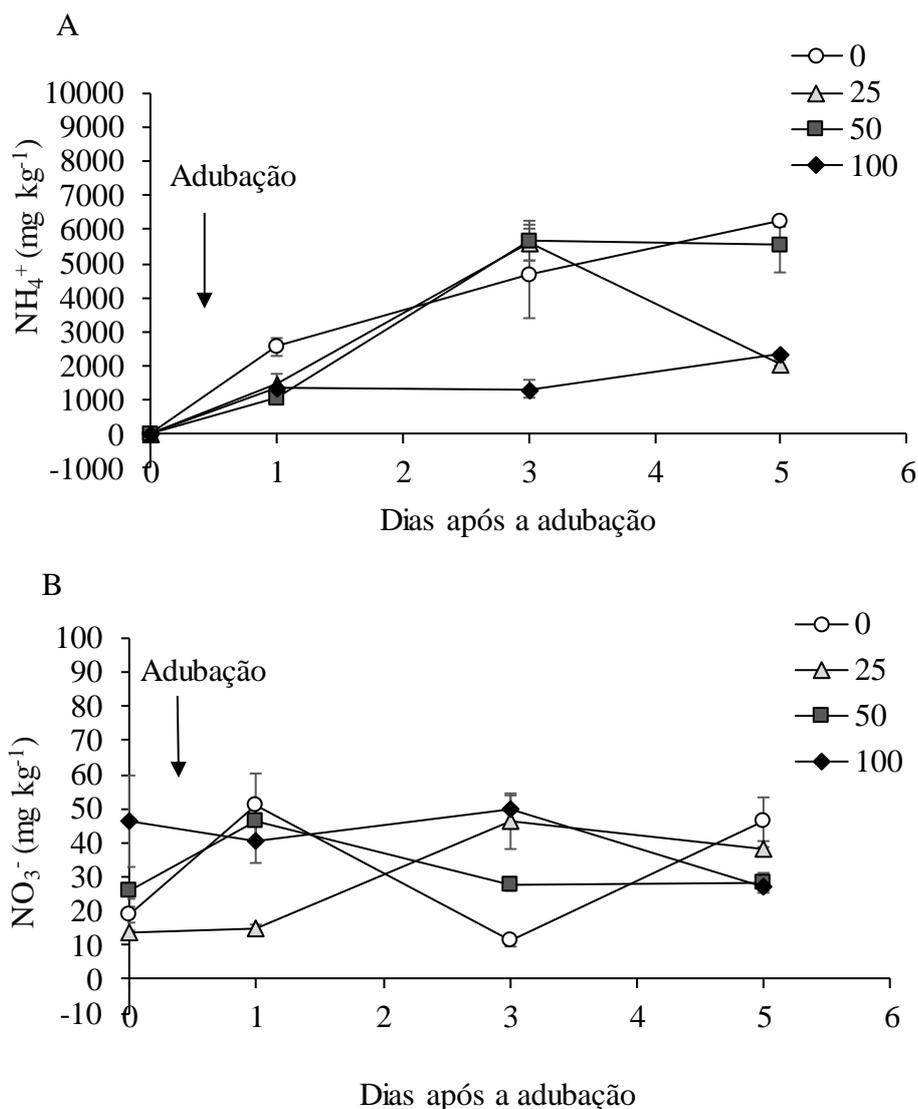


Figura 47. Teores de amônio (A) e nitrato (B) no solo, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES. Adubo nitrogenado (dose 100 kg ha⁻¹, fonte: sulfato de amônio).

Em relação aos valores de NO₃⁻ (Figura 47 B) no solo eles foram baixos durante o período de avaliação. Contudo, 3 dias após a adubação, que coincidiu com o primeiro pico de emissão de N₂O, observou-se uma queda brusca (mais de 40 mg Kg⁻¹) no valor de NO₃⁻ no tratamento com 0% de palha.

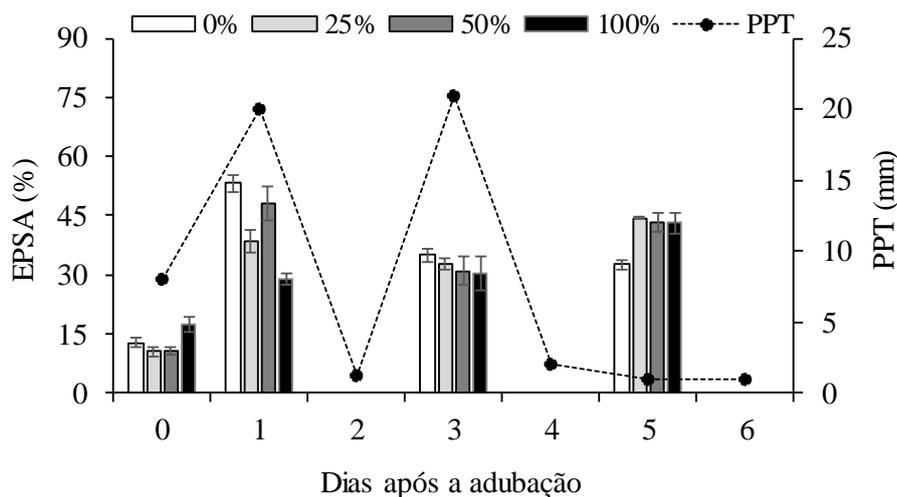


Figura 48. Espaço poroso saturado por água (EPSA) e precipitação (PPT) no período de coleta de óxido nitroso, dois anos após a aplicação de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, sob Argissolo Amarelo, em Linhares-ES

4.5.10 Fauna do solo

A maior densidade de indivíduos da fauna epigeica do solo, um ano após a deposição de diferentes níveis de palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, foi observada no tratamento com maior nível de palhada (100% – 569 indivíduos) distribuído de forma homogênea sobre a superfície do solo, principalmente quando comparado ao tratamento com remoção total da palhada do solo (0% - 230 indivíduos) (Figura 49). A resposta positiva do número de indivíduos a partir de níveis crescentes de palhada sobre o solo está associada a maior oferta de alimentos e umidade do solo. O que favorece o maior número e desenvolvimento da fauna epigeica do solo (Gatiboni et al., 2009).

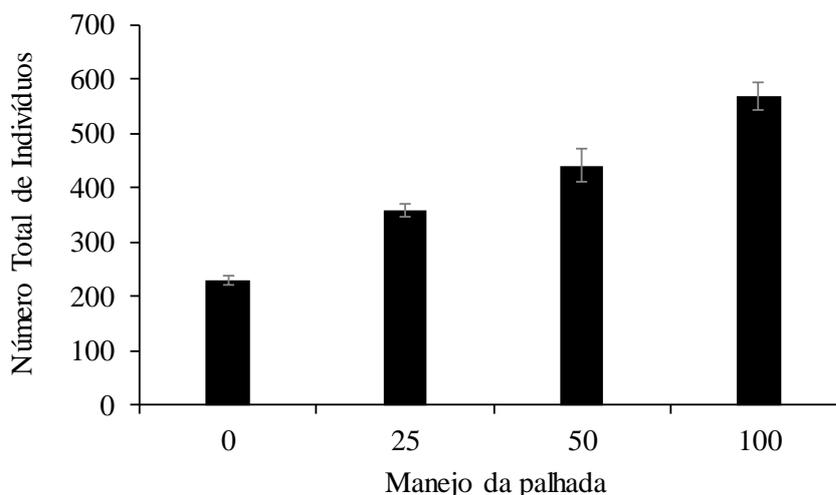


Figura 49. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, um ano após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar, em Linhares- ES (agosto de 2016)

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%) e com a palhada enleirada na entrelinha (enlei).

A alta sensibilidade da fauna epigeica ao manejo da cobertura vegetal e dos resíduos vegetais têm sido apontada como a principal justificativa para a sua utilização como indicadora de qualidade do solo (Brito, 2016; Portilho et al., 2011).

Portilho e colaboradores (2011) ao avaliar o efeito de diferentes deposições de palha da cana-de-açúcar (0, 50 e 100%) sobre Latossolo Vermelho Eutroférico (textura argilosa), no município de Itaporã-MS, sobre o número de indivíduos da fauna invertebrada no solo não observaram diferença significativa entre os diferentes níveis de palha e a vegetação nativa. Contudo, verificaram maior riqueza e diversidade da comunidade da fauna invertebrada epigeica nos tratamentos com vegetação nativa e com 100% de manutenção da palha sobre a superfície do solo.

O que corrobora em partes com esse estudo, onde os maiores índices de riqueza total e de Shannon (Tabela 22) foram observados no tratamento com 100% de palha (19,0 e 3,07, respectivamente) e os menores no tratamento com remoção total da palha (11,0 e 2,77, respectivamente).

O índice de equitabilidade (Pielou) está relacionado a dominância de alguns grupos em relação aos demais encontrados, mas que possuem baixa representatividade em termos numéricos. Os índices de Pielou variam de 0 a 1 (valores próximos de 0 indicam dominância de poucos grupos e valores próximos de 1 baixa dominância de determinados grupos) (Pasqualin et al., 2012). A remoção total da palha resultou o maior índice de Pielou (0,80) principalmente em relação ao tratamento com remoção de 50% de palha (0,64 e 0,69, respectivamente). Esse resultado está associado a distribuição mais homogênea dos indivíduos dentro de cada grupo (Figura 33) no tratamento com 0% de palha em relação aos demais.

Em estudo com diferentes níveis de remoção da palha da cana-de-açúcar do solo, em União-Pi, Abreu et al. (2014), também encontraram maior índice de Pielou no tratamento com 0% de palha em relação aos tratamentos com maiores níveis de palha sobre o solo, em período seco de avaliação. Já em período chuvoso de avaliação, esses autores encontraram resultados discrepantes, o que indica que as condições climáticas também influenciam nos índices ecológicos da fauna epigeica do solo.

Tabela 22. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Linhares - ES, agosto de 2016).

TRATAMENTOS	Indivíduos armadilha ⁻¹ dia ⁻¹	Erro Padrão	Riqueza Média	Riqueza Total	Índice de Shannon	Índice de Pielou
0%	8,21	2,24	8,50	11,00	2,77	0,80
25%	12,79	3,62	10,25	15,00	3,00	0,77
50%	15,79	5,40	10,00	16,00	2,75	0,69
100%	20,32	6,81	11,00	19,00	3,07	0,72

Tratamentos = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

Os grupos mais frequentes nos tratamentos 100% de palha, enleirado e 0% de palha foram Formicidae (30,7, 15,8 e 32,6 %, respectivamente), Coleoptera (16,8, 30,4 e 15,2 %, respectivamente) e Entomobryomorpha (11,7, 25,7 e 13,9 %, respectivamente), no tratamento com 50% de palha foram os grupos Formicidae (34,7%), Poduromorpha (20,9%) Entomobryomorpha (15,4%) e no tratamento com 25% de palha foram os grupos Coleoptera (27,3%), Entomobryomorpha (17,2%) e Acari (14,4%), por apresentarem as maiores quantidades de indivíduos em relação aos demais grupos (Figura 50).

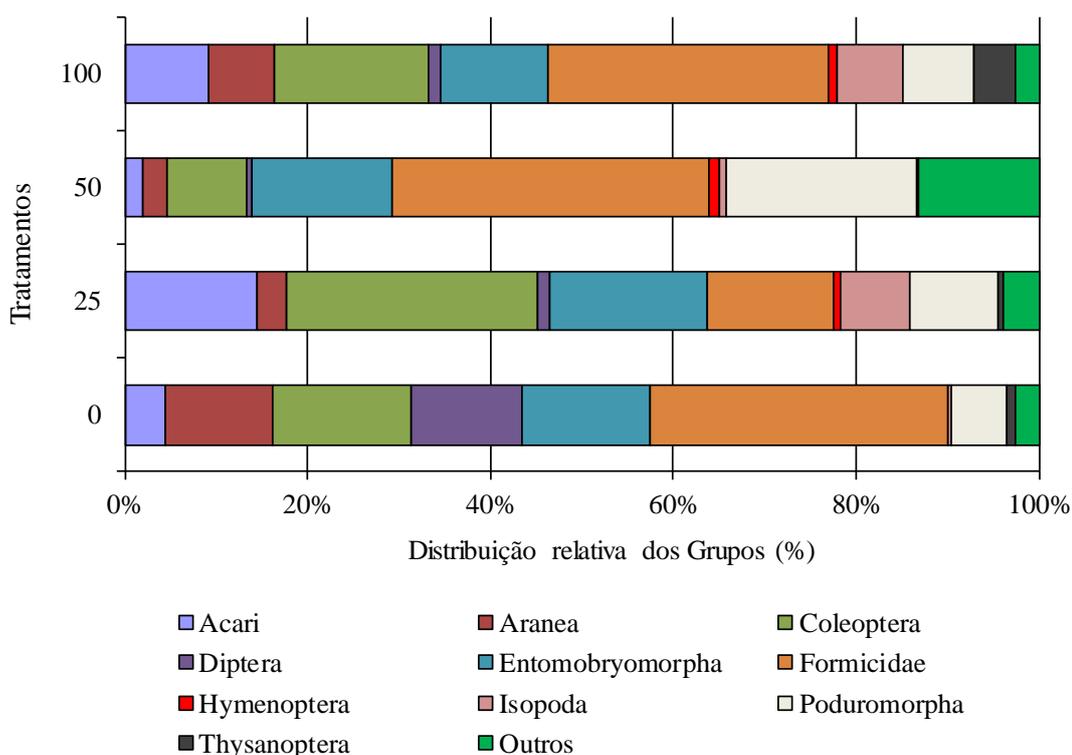


Figura 50. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, um ano após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palhada em Linhares- ES (agosto de 2016).

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

A maior distribuição relativa dos grupos Formicidae e Entomobryomorpha, denominados de engenheiros do ecossistema e decompositores (Abreu et al., 2014), respectivamente, também tem sido relatada em outros trabalhos com diferentes manejos da palhada da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo (Abreu et al., 2014; Benazzi et al., 2013; Portilho et al., 2011). Contudo, nota-se que os diferentes níveis de palha da cana-de-açúcar tendem a favorecer grupos específicos da fauna epigeica do solo. Possivelmente, não só devido a diferença que acarretam diretamente na oferta de resíduos, mas também de umidade (Anjos et al., 2017) e temperatura do solo (Tim et al., 2002).

No segundo ano de avaliação do efeito dos níveis de palha sobre o número total de indivíduos que compõem a fauna epigeica do solo (Figura 51), observa-se um comportamento muito semelhante aos observado no primeiro ano (Figura 49), onde quanto menor a remoção de palha maior o número de indivíduos encontrados.

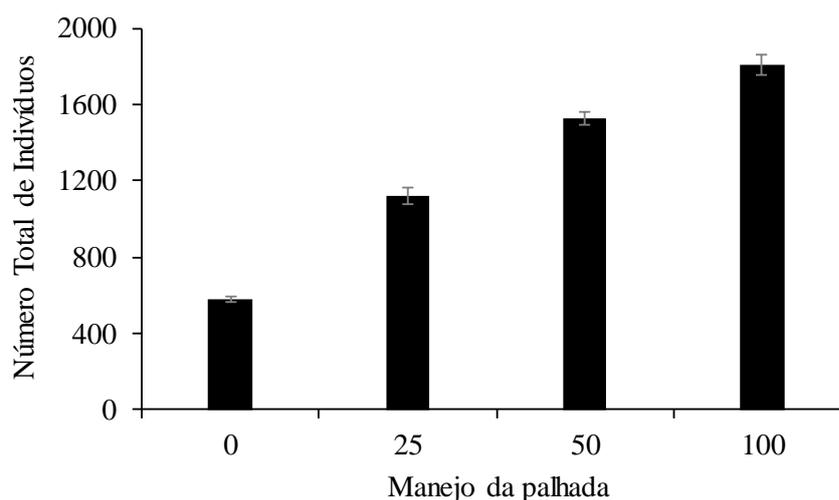


Figura 51. Número total de indivíduos da fauna invertebrada, dois anos após instalação do experimento, sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar, em Linhares- ES (setembro de 2017).

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

Porém, o que chama a atenção é que independente dos tratamentos avaliados o número médio de indivíduos da fauna invertebrada mais que triplicou o seu valor do primeiro (413 indivíduos) para o segundo (1330 indivíduos) ano de avaliação. O que confirma o efeito significativo do clima sobre a fauna epigeica do solo (Abreu et al., 2014; Camara et al., 2012). Esse resultado possivelmente ocorreu devido a maior disponibilidade hídrica registrada no segundo ano (1058 mm) em relação ao primeiro ano (577 mm).

A maior incidência do grupo Entemobryomorpha no ano de maior precipitação, possivelmente, está associado a disponibilidade de alimento. Já que esses organismos são micrófagos, se alimentando principalmente de fungos (Camara, 2012).

Os maiores índices pluviométricos observados no segundo ano de avaliação possivelmente influenciaram na distribuição relativa dos grupos da fauna epigeica do solo (Figura 52) e consequentemente nos índices ecológicos (Tabela 23). Nota-se que, independente do tratamento o grupo de Entemobryomorpha representou em média 66% da distribuição relativa da fauna do solo. Contudo, a dominância desse grupo foi mais elevada no tratamento com 50% de palha (80,6 %) quando comparado principalmente ao tratamento sem remoção da palha (49,6 %), o que resultou em índices de equitabilidade de menores (0,28) e maiores (0,54), respectivamente.

Em relação aos índices ecológicos da fauna epigeica do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar, nota-se que os índices de Shannon e Pielou apresentaram valores médios mais baixos (1,82 e 0,46, respectivamente) no segundo ano em comparação ao primeiro ano (2,88 e 0,72), devido a dominância do grupo Entemobryomorpha em relação aos demais, favorecido por fatores abióticos (precipitação).

Os valores riqueza total (nº de grupos encontrados em cada tratamento) foram 47,6 % mais elevados no tratamento com 100% (19,0) de palha em relação ao com 0% (10) de palha. Esse resultado se deve a condições mais restritas de sobrevivência a determinados grupos condicionadas no sistema com remoção total da palha (Abreu et al., 2014).

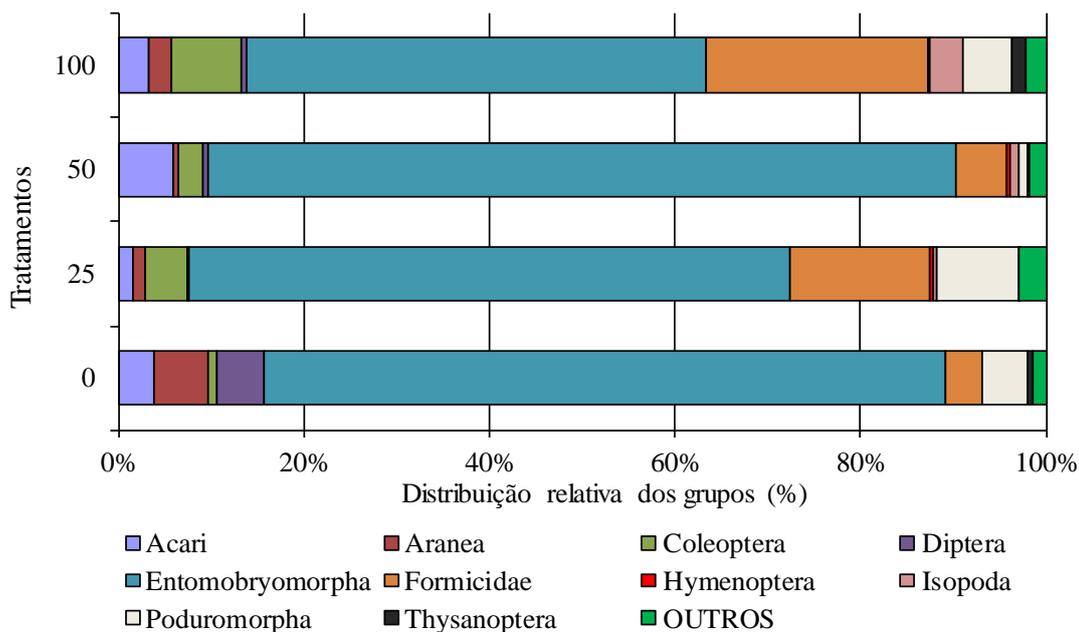


Figura 52. Distribuição relativa das comunidades de fauna invertebrada do solo, dois anos após a instalação do experimento, sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palhada em Linhares- ES (setembro de 2017)

Manejo da palhada = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

No tratamento com 100% de palha o primeiro, segundo e terceiro grupo que apresentaram maior distribuição relativa foram Entomobryomorpha (micrófagos), Formicidae (engenheiros) e Poduromorpha (micrófagos), respectivamente (Figura 52). Entretanto, o tratamento com 100% de palha foi o que apresentou maior número de indivíduos e os melhores índices ecológicos em relação aos demais tratamentos, sendo recomendado a não remoção de palha do solo, visto que esse resultado é um indicativo de estágio mais avançado de conservação do sistema.

Em áreas de mata sob diferentes estádios sucessionais, no bioma Mata Atlântica, Machado et al. (2015) também observaram que o grupo Entomobryomorpha foi o principal responsável pela diminuição do índice de Pielou, graças a maior dominância desse grupo em relação aos demais. Contudo, esses autores verificaram que a distribuição relativa desse grupo era menor em área de mata em estágio avançado quando comparado a área de mata em estágio inicial.

Tabela 23. Número de indivíduos por armadilha ao dia e índices ecológicos da fauna invertebrada do solo sob o cultivo de cana-de-açúcar, dois anos após a deposição de diferentes níveis de palhada sobre o solo (Linhares - ES, setembro de 2017).

TRATAMENTO	Indivíduos armadilha ⁻¹ dia ⁻¹	Erro Padrão	Riqueza Média	Riqueza Total	Índice de Shannon	Índice de Pielou
0%	16,54	3,52	7,00	10,0	1,56	0,47
25%	32,06	8,10	10,00	17,0	1,96	0,48
50%	43,66	6,20	11,40	21,0	1,24	0,28
100%	51,66	17,19	10,80	19,0	2,30	0,54

Tratamentos = diferentes porcentagens de palhada sobre a superfície do solo (0%, 25%, 50% e 100%).

4.6 CONCLUSÕES

A produtividade da cana-de-açúcar na 1ª e 2ª soca respondeu positivamente aos maiores níveis de palha sobre a superfície do solo.

A manutenção de 100% (9,2 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha sobre a superfície do solo garantiu maior rendimento da cultura, valores de K⁺ na camada superficial e menor acidez do solo nas camadas subsuperficiais (10-20 e 20-40 cm), após um ano de aplicação da palha, em ano com restrição hídrica.

Em dois anos consecutivos, a manutenção de 100% de palha aumentou os valores de Ca²⁺, principalmente, nas camadas 5-10 e 10-20 cm e diminuiu os valores de pH na camada de 30-40 cm.

Em ano com precipitação normal durante o ano (segundo ano de avaliação) a manutenção de pelo menos 50% (4,53 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha sobre a superfície do solo já garante bom rendimento da cultura.

A deposição de 50 e 100% de palha da cana-de-açúcar sobre Argissolo Amarelo, por dois anos consecutivos, aumentou o aporte de carbono orgânico do solo nos primeiros 5 cm de profundidade do solo e o teor de nitrogênio na camada de 40-60 cm.

A deposição de 100% de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo, contribuiu de forma mais significativa na manutenção da qualidade física do solo, nas camadas de 0-5, 10-20 e 40-60 cm, após a colheita de duas socas.

A deposição de 50% de palha da cana-de-açúcar sobre a superfície do solo beneficiou o aporte de fração leve livre, bem como, na maior agregação do solo, na camada mais superficial. Contudo, a deposição de diferentes níveis de palha no solo não influenciou no aporte de fração leve livre intra-agregado, sendo necessário um maior período de monitoramento do experimento para melhor entendimento do efeito desses níveis sobre o aporte das frações leves (FL). A FLL foi mais sensível ao manejo da palhada.

A escassez de chuva no período de amostragem do gás óxido nitroso impossibilitou identificar com precisão o nível de palha que proporcionou a maior emissão de N₂O. A aplicação de lâminas d'água associada a menor porosidade do solo no tratamento com 0% de palha proporciona condições favoráveis a emissão de N₂O.

A manutenção de toda a palha (100%) da cana-de-açúcar sobre o solo favoreceu o maior número de indivíduos de fauna epigeica, bem como maior diversidade de grupos, em dois anos consecutivos de avaliação.

A fauna do solo mostrou-se sensível aos níveis de palha da cana-de-açúcar aplicados ao solo e as condições climáticas da área de cultivo. A escassez de chuva favoreceu a comunidade Formicidae, entretanto, em ano com disponibilidade normal de chuva a maior distribuição relativa foi representada pelo grupo Entomobryomorpha.

5 CONCLUSÕES GERAIS

As condições discrepantes de clima, solo, espaçamento de plantio e variedades utilizadas influenciam de maneira distinta na produção de massa seca de palha da cana-de-açúcar, bem como, no nível ideal de palha a ser mantido no sistema de cultivo para a garantia da qualidade química, física e biológica do solo, do balanço positivo de C e N no sistema e da produtividade da cultura. Esses fatores impedem uma única recomendação da quantidade ideal de palha a ser mantida na superfície do solo para as distintas regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil.

Em condições de cultivo em Colorado-PR (região sul do país) a produção média de massa seca de palha da cana-de-açúcar (variedade RB-867515) sob cultivo duplo alternado (0,9 x 1,5 m) em Latossolo Vermelho foi de 14,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Além disso, a disponibilidade hídrica em cada soca foi de aproximadamente 1750 mm. Nessas condições a manutenção de 50% (7,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha sobre a superfície do solo, com base em dados de dois anos consecutivos, é a mais recomendada quando se considera o aporte de fração leve livre da matéria orgânica, que é a primeira entrada de C, N e demais elementos no solo, carbono e nitrogênio do solo (linha trafegada: 1,5 m), manutenção da qualidade física do solo e rendimento da cultura.

Entretanto a quantidade de 100% de palha foi a mais eficiente na garantia dos atributos biológicos do solo, garantindo a maior diversidade e equitabilidade dos grupos da fauna epigeica do solo. Contudo, em épocas de chuva ocorridas após a adubação nitrogenada das socas, a manutenção de 100% de palha também resulta em maior emissão acumulada de N₂O. Assim, faz-se necessário estudos que contabilizem o balanço entre a entrada e saída de carbono do solo, em carbono equivalente, para avaliar qual a quantidade mais adequada de palha a ser mantida no solo para a contribuição da mitigação dos gases do efeito estufa na agricultura.

Já em condições de cultivo da cana-de-açúcar (variedade RB-966928), em Linhares-ES (região sudeste do país), a produção média de massa seca de palha, sob cultivo em espaçamento simples em Argissolo Amarelo, é de 9,20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, 38% menor que em Colorado. Além disso, a disponibilidade hídrica média das duas socas avaliadas foi de aproximadamente 800 mm, ou seja, menos da metade da média Colorado. Nessas condições a manutenção de 100% (9,20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) de palha sobre a superfície do solo, por dois anos consecutivos, é a quantidade que resulta em maiores aportes de carbono e nitrogênio do solo, manutenção da qualidade física e biológica do solo, bem como no maior rendimento da cultura.

Assim, com base nesse estudo nota-se que de maneira geral a retirada total da palha da cana-de-açúcar para co-geração de energia ou álcool de segunda geração causa danos aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, e no rendimento de colmos. E que, a recomendação da quantidade ideal de palha a ser mantida no campo depende das condições específicas de cultivo, clima, solo e cultura utilizada em cada região. Nas condições desse estudo os resultados apontam que na região Sul do país, a quantidade de palha mais recomendada é de 50 % (7,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). E na região Sudeste recomenda-se a manutenção de 100% de palha (9,20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Em termos quantitativos, os valores recomendados são próximos entre si para as duas regiões produtoras de cana-de-açúcar do país, o que indica que em regiões com maior produção de massa seca de palha pode-se retirar parte da palha sem causar prejuízos à qualidade do solo e ao rendimento da cultura.

Contudo, embora esse estudo apresente resultados de diferentes condições de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, recomenda-se o acompanhamento do efeito de diferentes níveis de palha sobre a qualidade do solo, a emissão de gases do efeito estufa e produtividade de colmos ao longo de um maior período de tempo, para sedimentar a recomendação da quantidade mínima de palha que garanta um sistema de produção de cana-de-açúcar mais sustentável.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÃO, J.S. Níveis de palhadas e preparos do solo em cultivos de cana-de-açúcar: impacto sobre a fauna edáfica e epigeica. 2012. 49 p. Dissertação (Mestrado Agronomia). Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Aquidauana – MS.
- ABREU, R.R.L.; LIMA, S.S., OLIVEIRA, N.C.R.; LEITE, L.F.C. Fauna edáfica sob diferentes níveis de palhada em cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.44, n.4, p.409-416, 2014.
- ABREU, R.R.L. Dinâmica de carbono e fauna do solo sob diferentes níveis de palhada de cana-de-açúcar (*Sacharum ssp.*). 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus-PI.
- AGÊNCIA NACIONAL ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Matriz de Energia Elétrica. 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>.
- ANDRADE, N.S.F.; MARTINS FILHO, M.V.; TORRES, J.L.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR. Impacto técnico e econômico das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.31, n.3, p.539-550, maio/jun. 2011.
- ANJOS, J.C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; NOLETO, D.H.; MELO, F.B.; BRITO, R.R. Armazenamento de água em Plintossolo Argilúvico cultivado com cana-de-açúcar sob níveis de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, p. 464-473, 2017.
- AQUINO, G.S.; DE CONTI MEDINA, C.; COSTA, D.C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A.D.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; CARVALHO, J.B.; MOREIRA, A. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. *Industrial Crops & Products*, v.111, p.572-578, 2018.
- AQUINO, G.S.; DE CONTI MEDINA, C.; COSTA, D.C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A.D. Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. *Industrial Crops and Products*, v.102, p.58–64, 2017.
- AQUINO, G.S.; DE CONTI MEDINA, C.; JUNIOR, A.L.P.; SANTOS, L.O.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; SANTIAGO, A.D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana de açúcar sob diferentes quantidades de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, n.12, p.1150-1159, 2015. DOI: 10.1590/S0100 204X2015001200004.
- AQUINO, A. M. de; AGUIAR-MENEZES, E. L.; QUEIROZ, J. M. de. Recomendação para coleta de artrópodes terrestres por armadilhas de queda (Pitfall traps). Embrapa Agrobiologia, 8 p. 2006. (Circular Técnica, 18).
- AWE, G.O.; REICHERT, J.M.; WENDROTH, O.O. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v.150, p.93–106, 2015.
- BAGGS, E. M.; STEVENSON, M.; PIHLATIE, A.; REGAR, H.; COOK, H.; CADISH, G. N₂O emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. *Plant and Soil*, v.254, p. 361-370, 2003.

- BALL-COELHO, B., SALCEDO, I.H., TIESSEN, H., STEWART, J.W.B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.57, p.1027-1034, 1993.
- BAPTISTA, R.B.; DE MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the ¹⁵N natural abundance of plant-available N with soil depth: Their influence on estimates of contributions of biological N₂ fixation to sugar cane. *Applied Soil Ecology*, v.73, p.124-129, 2014.
- BARRETTA, D.; BORGES, C. D.; COSTA, A. R.; SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M. Efeito do cultivo do solo sobre a diversidade da fauna edáfica no planalto sul catarinense. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 5, n. 2, p. 108-117, 2006.
- BARROS, S.J.D.; CHAVES, L.H.G.; CHAVES, B.I.; FARIAS, A.C.H.; PEREIRA, W.E. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos tabuleiros costeiros paraibanos. *Revista Caatinga*, v.26, p.35-42, 2013.
- BASANTA, MARIA DEL VALLE. Dinâmica do nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo de resíduos da colheita. 2004. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. doi:10.11606/T.11.2004.tde-08092004-163918. Acesso em: 2018-05-17.
- BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CA´SSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; DE MACEDO, J.R. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. *Geoderma*, v.116, p.235–248, 2003.
- 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.
- BENZAZZI, E.S.; BIANCHI, M.O.; CORREIA, M.E.F.; LIMA, E.; ZONTA, E. Impactos dos métodos de colheita da cana-de-açúcar sobre a macrofauna do solo em área de produção no Espírito Santo–Brasil. *Semina: Ciências Agrárias*, 34:3425-3442, 2013.
- BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M.; BALL-COELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSEN, H. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. *Australian Journal of Soil Research*, v. 36, p. 873–881, 1998.
- BORDONAL, R.O; DE FIGUEIREDO; E.B, LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. *Glob Change Biol Bioenergy*, v.4, p.846- 858, 2012.
- BRITO, M.F.DE; TSUJIGUSHI, B.P.; OTSUBO, A.A.; DA SILVA, R.F.; MERCANTE, F.M. Diversidade da fauna edáfica e epigeica de invertebrados em consórcio de mandioca com adubos verdes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.5, p. 253-260, 2016.
- CABRAL, C.E.A.; BONFIM-SILVA, E.M.; BONELLI, E.A.; DA SILVA, T.J.A.; CABRAL, C.H.A.; SCARAMUZZA, W.L.M.P. Compactação do solo e macronutrientes primários na *Brachiaria brizantha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.362–367, 2012.
- CAMARA, R.; CORREIA, M.E.F.; VILLELA, D.M. Effects of eucalyptus plantations on soil arthropod communities in a Brazilian Atlantic Forest conservation unit. *Bioscience Journal*, v. 28, p. 445-455, 2012.

- CANELAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.935-944, 2003.
- CARMO, J.B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.C.; DE SOUSA NETO, E.R.; PITOMBO, L.M.; DUARTE NETO, P.J.; VARGAS, V.P.; ANDRADE, C.A.; GAVA, G.J.C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; NETO, A.E.; MARTINELLI, L.A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *Global Change Biology Bioenergy*, v.5, p.267-280, 2013.
- CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. (2001) In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (Ed.). *Sustainable management of soil organic matter*. New York: CABI Publishing, p. 9-22.
- CARVALHO, A.M.; COELHO, M.C.; DANTAS, R.A.; FONSECA, O.P.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; FIGUEIREDO, C.C. Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. *Crop and Pasture Science*, v. 63, p. 1075 - 1081, 2012.
- CARVALHO, J.L.N.; HUDIBURG, T.W.; FRANCO, H.C.J.; DELUCIA, E.H. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. *Global Change Biology Bioenergy*, v.9, p.1333-1343, 2017.
- CARVALHO, J.L.N.; NOGUEIROL, R.C.; MENANDRO, L.M.S.; BORDORAL, R.O.; BORGES, C.D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *Global Change Biology Bioenergy*, v.9, p.1181-1195, 2017.
- CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L. N.; DE MELLO, C.R.; CERRI, C.E.P. Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.2, p.277-289, 2010.
- CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no Estado do Espírito Santo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.1467-1473, 1999.
- CERRI, C.C.; GALDOS, M.V.; MAIA, S.M.F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; POWLSON, D.; CERRI, C.E.P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. *European Journal of Soil Science*, v.62, n.1, p.23-28, 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar, Segundo Levantamento, Brasília, v.4, Safra 2017/2018, n.2, p. 73, agosto 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.
- CORBEELS, M.; MARCHÃO, R.L.; SIQUEIRA NETO, M.; FERREIRA, E.G.; MADARI, B.E.; SCOPEL, E.; BRITO, O.R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Nature Comm. Sci. Rep.* v. 6, p. 21450, 2016. <http://dx.doi.org/10.1038/srep21450>.
- CORREIA, B.L.; ALLEONI, L.R.F. Conteúdo de carbono e atributos químicos de Latossolo sob cana-de-açúcar colhida com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, n.8, p.944-952, 2011.

- COSTA, K.A.DE P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I.P.DE O.; RODRIGUES, C.; SEVERIANO, E.DA C. Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim-marandu. I - Alterações nas características químicas do solo. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.32, p.1591-1599, 2008.
- COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. N-NH₃ losses from nitrogen sources applied over unburned sugarcane straw. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.4, p.631-637, 2003.
- D'HOSE, T.; COUGNON, M.; VliegHER, A.D.; VANDECASTEELE, B.; VIAENE, N.; CORNELIS, W.; BOCKSTAELE, E.V.; REHEUL, DIRK. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*, v.75, p.189–198, 2014.
- DA ROS, C.O.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. *Ci. Rural*, v.35, p.799-805, 2005.
- DANTAS FILHO, P.L. Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. , 2009, 175 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DE OLIVEIRA, M.W.; TIVELIN, P.C.O.; KINGSTON, G.; BARBOSA, M.H.P.; VITTI, A.C. Decomposition and reslease of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* v.24, p.290–296, 2002.
- DUNGAIT, J.A.J.; HOPKINS, D.W.; GREGORY, A.S.; WHITMORE, A.P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Glob. Change Biol.*, v.18, p.781–1796, 2012.
- DUXBURY, J. M.; BOULDIN, D. R.; TERRY, R. E.; TATE, R. L. Emissions of N₂O from soils. *Nature*, v.298, p.462-464, 1982.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de Análise de solo. EMBRAPA/SNLCS. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; NETO, J.D. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.356–362, 2008.
- FIGUEIREDO, E.B.; SCALA JR, N.L. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agricultural, Ecosystem and Environment*, v.141, p.77–85, 2011.
- FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v.42, p.189-198, 2012.
- FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; FERREIRA, D.A.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R. Recovery of nitrogen (¹⁵N) by sugarcane from previous crop residues and urea fertilisation under minimum tillage system. *Sugar Tech*, v.13, p. 42-46, 2011.
- FRANCO, H.; OTTO, R.; FARONI, C.; VITTI, A.; OLIVEIRA, E.; TRIVELIN, P. Nitrogen in sugarcane derived from fertiliser under Brazilian field conditions. *Field Crops Research*, v.121, p.29–41, 2011.
- GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. *Geoderma*, v.153, p.347–352, 2009.

- GALLO, D.; NAKANO, O.; WIENDEL, F.M.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R.P.L.; BATISTA, G.C.; BERTI FILHO, E.; PARA, J.R.P.; ZUCCHI, R.A.; ALVES, S.B.; VENDRAMIN, J.D. Manual de entomologia agrícola. São Paulo, Ceres, 1988. 649p.
- GARBIATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; TOMASINI, B.A.; BERGAMIN, A.C.; PANACHUKI, E. Erosão entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.2145-2155, 2011.
- GATIBONI, L.C.; COIMBRA, J.L.M.; WILDNER, L.DO P.; DENARDIN, R.B.N. Modificações na fauna edáfica durante a decomposição da palhada de centeio e aveia preta, em sistema plantio direto. *Biotemas*, v.22, p.45-53, 2009.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *European Journal Soil Science*, v.53, p.589-598, 2002.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; ZELLES, L.E.; MEYER, J.H. Longterm effects of green cane harvesting versus burning on the size and diversity of the soil microbial community. *Proceedings of th South African Sugar Technologists' Association*, v.75, p.228-234, 2001.
- GUIMARÃES, N. de F.; FONTANETTI, A.; FUJIHARA, R. T.; GALLO, A. D. S.; SOUZA, M. D. B. D.; MORINIGO, K. P. G.; SILVA, R. F. D. Fauna invertebrada epigéica associada a diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. *Coffee Science*, v. 11, n. 4, p. 484 – 494, 2016.
- HEMWONG, S.; TOOMSAN, B.; CADISCH, G.; LIMPINUNTANA, V.; VITYAKON, P.; PATANOTHAI, A. Sugarcane residue management and grain legume crop effects on N dynamics, N losses and growth of sugarcane. *Nutr Cycl Agroecosys*, v.83, p.135-151, 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Produção Agrícola Municipal - Culturas temporárias e permanentes*, v. 39, 2012, Brasil.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policymakers*. T.C.W. TEAM; R. K. PACHAURI; L. MEYER, editors. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ISMAEL, F.M.; SEERUTTUN, S.; BARBE, C.; GAUNGOO, A. Improving cane productivity with dual row planting in Mauritius. *Proceedings - International Society of Sugarcane Technologist*, Durban, v.26, p.220-228, 2007.
- JANTALIA, C.P.; DOS SANTOS, H. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in 29 the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Dordrecht, v. 82, n. 2, p.161- 173, 2008.
- JIANG, C.M.; YU, W.T.; MA, Q.; XU, Y.G.; ZOU, H. Alleviating global warming potential by soil carbon sequestration: A multi-level straw incorporation experiment from a maize cropping system in Northeast China. *Soil & Tillage Research*, v. 170, p. 77-84, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.03.003>.
- JOHN, B.; YAMASHITA, T.; LUDWIG, B.; PAUSTIAN, K. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*, 128, 63, 2005.

- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L. (Eds). Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Mitt, v. 64, p. 193-203, 1918.
- LANGE, A.; CRUZ, J.C.; MARQUES, J.J. Estoque de nutrientes no perfil do solo influenciados por doses de palha e nitrogênio no milho em semeadura direta. Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta, v.6, p.29- 38, 2008.
- LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J.P. Soil invertebrates and ecosystem services. European Journal of Soil Biology, v.42, p.3-15, 2006.
- LEAL, M.R.L.V.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. Biomass and Bioenergy, v.53, p.11-19, 2013. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.03.007.
- LEME FILHO, J.R.A. Desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) sob diferentes formas de colheita e de manejo de palhicho. 2009. 111p. Tese (Doutorado) em Agronomia - Fitotecnia). Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. Advances in Soil Science, New York-NY, v. 01, n. 01, p. 277-294, 1985.
- LI, S.; GU, X.; ZHUANG, J.; AN, T.; PEI, J.; XIE, H.; LI, H.; FU, S.; WANG, J. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility. Soil & Tillage Research, v.155, p.199–206, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.08.009.
- LOPES, I.M.; PINHEIRO, E.F.M.; LIMA, E.; CEDDIA, M.B.; CAMPOS, D.V.B; ALVES, B.J.R. Emissões de N₂O em solos sob cultivo de cana-de-açúcar no bioma Mata Atlântica: efeito dos sistemas de colheita e da adubação com vinhaça. Revista Virtual de Química, v.9, 2017.
- LOPES, I.M.; ASSUNÇÃO, S.A.; OLIVEIRA, A.P.P.DE.; ANJOS, L.H.C.; PEREIRA, M.G.; LIMA, E. Carbon fractions and soil fertility affected by tillage and sugarcane residue management of a Xanthic Udults. Semina: Ciências Agrárias, v. 38, p. 2921-2932, 2017.
- LUCA, E.F.DE; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.789-800, 2008.
- MACHADO, D.L.; PEREIRA, M.G.; CORREIA, M.E.F.; DINIZ, A.R.; MENEZES, C.E.G. Fauna edáfica na dinâmica sucessional da Mata Atlântica em floresta estacional semidecidual na bacia do rio Paraíba do Sul – RJ. Ciência Florestal, v. 25, p. 91-106, 2015.
- MACHADO, W.; TELLES, T.S.; FILHO, J.T.; GUIMARÃES, M.F.; ALVES, G.B.; BORGES, J.L.B. Physical properties of a Rhodic Haplustox under two sugarcane harvesting systems. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.34, p.1803-1809, 2010.
- MALHI, S.S.; NYBORG, M.; GODDARD, T.; PUURVEEN, D. Long-term tillage, straw management and N fertilization effects on quantity and quality of organic C and N in a Black

Chernozem soil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* v. 90, p. 227–241, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-011-9424-6>.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plant. 2. ed. New York: Academic, 1995. 889 p.

MARTINS, M.R.; JANTALIA, C.P.; POLIDORO, J.C.; BATISTA, J.N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. *Soil Till. Res.* 151, 75–81, 2015.

MARQUES, T.A.; SASSO, C.G.; SATO, A.M.; SOUZA, G.M. Queima do canalial: Aspectos sobre a biomassa vegetal, fertilidade do solo e emissão de CO₂ para atmosfera. *Biosci. J.*, v.25, p.83-89, 2009.

MEGDA, M.X.V.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; VITTI, A.C. Agronomic efficiency of nitrogen fertilizers on green harvesting sugarcane ratoon. *Pesqui. Agropecu. Bras.* v.47 (12), p.1681–1690, 2012.

MEIER, E.A.; THORBURN, P.J.; WEGENER, M.K.; BASFORD, K.E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. *Nutr Cycl Agroecosy*, v.75, p.101-114, 2006.

MENANDRO, L.M.S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; KÖLLN, O.T.; PIMENTA, M.T.B.; SANCHES, G.M.; RABELO, S.C.; CARVALHO, J.L.N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, v.11, p.488–504, 2017.

MENDOZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.1, p.201-207, 2000.

METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J.M.; MOREIRA, J.A.A.; MARAUX, F.; FEIGL, B.J.; FELLER, C. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, v. 141, p. 78-88, 2007.

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC): "Estimativas Anuais de Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil", referentes ao período de 2010 a 2014. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/ciencia-e-tecnologia/2016/12/governo-publica-novos-dados-de-emissao-de-gases-de-efeito-estufa> >. Acesso em: 02 de agosto de 2017.

MIRANSARI, M.; BAHRAMI, H.A.; REJALI, F.; MALAKOUTI, M.J. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. *Soil & Tillage Research*, v.103, p.282–290, 2009.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. 2006. Ciclos dos elementos. In: *Microbiologia e bioquímica do solo*, MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. (Eds). Lavras: UFLA, p: 263-311.

NEVES, C.M.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MACEDO, R.L.G.; TOKURA, A.M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região Noroeste do estado de Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v.28, p.1038-1046, 2004.

OADES, J.M. 1995. An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. In: Zepp, R.G.; Sonntag, C. (Eds). Role of Non Living Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle. John Wiley, New York. p.55-94.

ODUM, E.P. Ecología. 3.ed. La Habana, Edición Revolucionaria, 1989. 639p.

OLIVEIRA, A.P.P.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; ZONTA, E.; PEREIRA, M.G. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: Conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18. p. 939-947, 2014.

OLIVEIRA, B.G.; CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J. Soil green house gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. Geoderma, v. 200-201, p.77-84, 2013.

PASQUALIN, L.A.; DIONÍSIO, J.A.; ZAWADNEAK, M.A.C.; MARÇAL, C.T. Macrofauna edáfica em lavouras de cana-de-açúcar e mata no noroeste do Paraná - Brasil. Semina: Ciências Agrárias, v. 33, n. 1, p. 7-18, 2012

PAUL, E.A.; FOLLETT, R.F.; LEAVITT, S.W.; HALVORSON, A.; PETERSON, G.A.; LYON, D.J. Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J., v.61, p.1058-1067, 1997.

PERES, J.G.; SOUZA, C.F.; LAVORENTI, N.A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. Engenharia Agrícola, v. 30, p. 875-886, 2010.

PIELOU, E. C. Mathematical ecology. New York: Wiley, 1977.

PINHEIRO, E.F.M. 2007. Fracionamento físico e Caracterização de Matéria Orgânica do Solo soluçar Diferentes Coberturas Vegetais. Tese de Doutorado em Agronomia. Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 98 pp.

PINHEIRO, E.F.M.; LIMA, E.; CEDDIA, M.B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. Plant and Soil, v.333, p.71-80, 2010.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; MACHADO, P.L.O.A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.731-737, 2004.

PORTILHO, I.I.R.; BORGES, C.D.; COSTA, A.R.; SALTON, J.C.; MERCANTE, F.M. Resíduos da cultura da cana-de-açúcar e seus efeitos sobre a fauna invertebrada epigeica. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 32, p. 959- 970, 2011.

POTRICH, D.C.; MARCHETTI, M.E.; POTRICH, D.C.; ENSINAS, S.C.; SERRA, A.P.; DA SILVA, E.F.; DE SOUZA, N.H. Decomposição de resíduos culturais de cana-de-açúcar submetidos a diferentes doses de nitrogênio. Semina: Ciências Agrárias, v. 35, p. 1751-1760, 2014.

PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. 18. ed. São Paulo: Nobel, 2006. 549 p.

RAIJ, B.V. Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

- RAMOS, N.P.; YAMAGUCHI, C.S.; PIRES, A.M.M.; ROSSETO, R.; POSSENTI, R.A.; PACKER, A.P.; CABRAL, O.M.R.; ANDRADE, C.A. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.51, n.9, p.1492-1500, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900048.
- ROBERTSON, F.A.; THORBURN, P.J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. *Australian Journal of Soil Research*, v.45, p.1–11, 2007. DOI: 10.1071/SR06079.
- ROBERTSON, F.A.; TORBURN, P.J. Crop residue effects on soil C and N cycling under sugarcane. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (ed.). *Sustainable management of soil organic matter*. Wallingford: CAB International, 2001. p.112-119.
- ROSIM, D.C.; DE MARIA, I.C.; E SILVA, R.L.; DA SILVA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. *Bragantia*, v.71, n.4, p.502-508, 2012.
- ROSSI NETO, J.; DE SOUZA, Z.M.; KÖLLN, O.T.; CARVALHO, J.L.N.; FERREIRA, D. A.; CASTIONI, G.A.F.; BARBOSA, L.C.; DE CASTRO, S.G.Q.; BRAUNBECK, O.A.; GARSIDE, A.L.; FRANCO, H.C.J. The Arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. *BioEnergy Research*, v. 11, p. 291-304, 2018.
- ROQUE, A.A. de O.; SOUZA, Z.M. de; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.744-750, 2010.
- SAIDY, A.R. Relationship between Water Content and Mineralization of Carbon and Nitrogen in Soils Varying in Physical and Chemical Characteristics. *Journal Tropical Soils*, v.18, n.1, p.45-52, 2013. DOI: 10.5400/jts.2012.18.1.45.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. ed. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 4. ed. – Brasília, DF, Embrapa, 2013. 306p.
- SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C. e ANJOS, L.H.C. dos. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Viçosa, MG, SBCS, 5ª ed., 100p., 2005.
- SATIRO, L.S.; CHERUBIN, M.R.; SAFANELLI, J.L.; LISBOA, I.P.; JUNIOR, I.P.P.R.R.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. *Geoderma Regional*, v. 11, p. 86–95, 2017.
- SCHAUFLER, G.; KITZLER, B.; SCHINDLBACHER, A.; SKIBA, U.; SUTTON, M.A. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science*, v.61, p.683–696, 2010.
- SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M.G.; ZONTA, E. Adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.811-820, 2010.
- SEGNINI, A.; CARVALHO, J.L.N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D.M.B.P.; SILVA, W.T.L.; SIMÕES, M.L.; CANTARELA, H.; DE MARIA, I.; MARTIN-NETO, L. Carbon stocks and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola*, v.70, n.5, p.321-326, 2013.

SHANNON, E. V.; WEAVER, W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

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

SIGNOR, D.; PISSIONI, L.L.M.; CERRI, C.E.P. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. *Bragantia*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/brag.2014.019>.

SILVA JUNIOR, C.A.; CARVALHO, L.A.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, E.C.A. Comportamento da Cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo, sob diferentes tipos de preparo. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 5, p. 1489-1500, 2013.

SILVA, L.A.da. Efeitos da renovação do canavial com diferentes sistemas de colheita, implantado com cultivo mínimo, sobre as propriedades químicas do solo, análise do crescimento, produtividade e acúmulo de nitrogênio em cana soca. 2000. 110p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ.

SILVA, R. F.; DA SILVA, R. F., CORASSA, G. M.; BERTOLLO, G. M.; SANTI, A. L.; STEFFEN, R. B. Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 43, n. 2, p. 130-137, 2013.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; La SCALA Jr, n.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.*, 8, 2013.

SILVEIRA, M.L.; COMERFORD, N.B.; REDDY, K.R.; COOPER, W.T.; EL-RIFAI, H. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis. *Geoderma*, v.144, p.405–414, 2008.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, v. 241, p. 155–176, 2002.

SMITH, K.A.; CONEN, F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use and Management*, v.20, p.255, 2004.

SOARES, J.R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M.L.C. Ammonia volatilization losses of surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biol. Biochem.*, v.52, p.82-89, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.019>.

SOHI, S.P.; MAHIEU, N.; ARAH, J.R.M.; POWLSON, D.S.; MADARI, B.; GAUNT, J.L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.65, p.1121–1128, 2001.

SOUSA, G.B.; MARTINS FILHO, M.V.; MATIAS, S.S. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba - SP. *Engenharia Agrícola*, v.32, n.3, p.490-500, 2012.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; MIRANDA, J. R. P.; SANTOS, R. V.; ALVES. A. R. Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.32, p.151-160, 2008.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana de açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.603 612, 2012. DOI: 10.1590/S0100 204X2012000400017.

- SOUZA, R.A.; TELLES, T.S.; MACHADO, W.; HUNGRIA, M.; FILHO, J.T.; GUIMARÃES, M.F. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*: v.155, p.1-6, 2012.
- SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. *Científica*, v.34, p.31-38, 2006.
- SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.271-278, 2005.
- TAGGART, M.; HEITMAN, J.L.; SHI, W.; VEPRASKAS, M. Temperature and water content effects on carbon mineralization for sapric soil material. *Wetlands*. v.32, p.939-944, 2012. DOI: 10.1007/s13157-012-0327-3.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).
- THORBURN, P.J.; MEIER, E.A.; COLLINS, K.; ROBERTSON, F.A. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil & Tillage Research*, v. 120, p.99-111, 2012. DOI: 10.1016/j.still.2011.11.009.
- TIEPPO, R.C.; ANDREA, M.C.S.; GIMENEZ, L.M.; ROMANELLI, T.L. Energy demand in sugarcane residue collection and transportation. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, p. 52-59, 2014.
- TIMM, L.C. Efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar nas propriedades físico húmicas de um solo. 2002. 115p. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FERREIRA, D.A.; VITTI, A.C.; FORTES, C.; FARONI, C.E.; OLIVEIRA, E.C.A; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, v.70, p.345-352, 2013.
- TORRES, J.L.; SILVA, V.R.; DE ASSIS, R.L.; SOUZA, Z.M.; VIEIRA, D.M.S.; TAMBURÚS, A.Y. Soil physical quality after the fifth and sixth harvest of sugarcane in Brazilian Cerrado. *Australian Journal of Crop Science*, v.10(9), p.1306-1311, 2016. DOI: 10.21475/ajcs.2016.10.09.p7776.
- TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; CUNHA, M.de.A.; MARTINS, M.E.; VIEIRA, D.M.da.S. Atributos físicos, químicos do solo e biomassa em sistemas de colheita de cana-de-açúcar. *Revista Ciências Agrárias*, v. 56, p. 311-318, 2013.
- URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; OLIVEIRA, O.C.; LIMA, E.; GUIMARÃES, D.H.V. Importância de não queimar a palha da cana-de-açúcar. *Comunicado Técnico. EMBRAPA*, n.5, 1991. 12p.
- URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S.; BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.56, p.105-114, 1992.

- URQUIAGA, S.; RODRIGUES ALVES, B.; BOODEY, R.M. Produção de biocombustíveis. A questão do balanço energético - Política Agrícola, Jan./Fev./Mar. 2005.
- VARGAS, V.P.; CANTARELLA, H.; MARTINS, A.A.; SOARES, J.R.; DO CARMO, J.B.; DE ANDRADE, C. A. Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. Sugar Tech, v.16, p.174-179, 2014.
- VASCONCELOS, A.L.S.; CHERUBIN, M.R.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.E.P.; GMACH, M.R.; SIQUEIRA-NETO, M. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. Biomass and Bioenergy, v.113, p.15-21, 2018.
- VASCONCELOS, R.F.B.de.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.D.; COSTA, Y.D.J.D.; CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo Distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.309-316, 2010.
- VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; LIMA, C.C.; PEREIRA, D.M., LIMA, M.E.; SOUSA, A.C.M.; SOUZA, G.S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.50, n.4, p.322-332, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000400008.
- VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FERREIRA, D.A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C.E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana- planta. Pesquisa Agropecuária. Brasileira, v.46, p.287-293, 2011.
- VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOVAJAR, J.G. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p.2757-2762, 2008.
- VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LUDWIG, B.; MATZNER, E.; FLESSA, H.; EKSCHMITT, K.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model. J. Plant Nutr. Soil Sci., v.171, p.111–124, 2008.
- WANG, D.; HE, N.; WANG, Q.; LU, Y.; WANG, Q.; XU, Z.; ZHU, J. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the changbai mountains, northeast China. Pedosphere, v.26, n.3, p.399–407, 2016. DOI: 10.1016/S1002-0160(15)60052-2.
- WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. Soil Till Res., v. 20, p. 69-85, 1991.
- YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. Como melhorar a eficiência da dubação nitrogenada do milho? Informações agronômicas, Piracicaba, n.91, 16 p. 2000.
- YAMAGUCHI, C.S.; RAMOS, N.P.; CARVALHO, C.S.; PIRES, A.M.M.; ANDRADE, C.A. Decomposição da palha de cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da massa inicialmente aportada sobre o solo e da aplicação de vinhaça. Bragantia, v. 76, n.1, p. 135-144, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.580>.
- YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Comm. Soil Sci. Plant Anal., v19, p.1467-1476, 1988.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of America Society Agronomy*, v.28, p.337-351, 1936.

ZHAO, S.; LI, K.; ZHOU, W.; QIU, S.; HUANG, S.; HE, P. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. *Agric. Ecosyst. Environ.* v. 216, p. 82–88, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.028>.

ZHU, L.; HU, N.; ZHANG, Z.; XU, J.; TAO, B.; MENG, Y. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice–wheat cropping system. *Catena*, v. 135, p. 283–289, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.008>.

ZOTELLI, L.C. Palha e vinhaça: emissões de CO₂, N₂O e CH₄ em solo com cana-de-açúcar. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), Instituto Agronômico, Campinas-SP.