INSTITUTO AGRONÔMICO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL

DECOMPOSIÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE APORTADA E DA APLICAÇÃO DE VINHAÇA

CARINA SAYURI YAMAGUCHI

Orientador: Cristiano Alberto de Andrade
Co-orientadora: Nilza Patrícia Ramos

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre** em Agricultura Tropical e Subtropical, Área de Concentração Gestão de Recursos Agroambientais.

Campinas, SP
Maio, 2015

Ficha elaborada pela bibliotecária do Núcleo de Informação e Documentação do Instituto Agronômico

Y19d Yamaguchi, Carina Sayuri
Decomposição da palha de cana-de-açúcar em função da quantidade aportada e da aplicação de vinhaça / Carina Sayuri Yamaguchi. Campinas, 2015. 56 fls.

Orientador: Cristiano Alberto de Andrade
Co-orientadora: Nilza Patrícia Ramos
Dissertação (Mestrado) Agricultura Tropical e Subtropical – Instituto Agronômico

1. Cana-de-açúcar 2. Qualidade 3. Vinhaça 4. Mineralização do carbono, 3. Mineralização do nitrogêni 4. Carboidratos estruturais
I. Andrade Cristiano Alberto de II. Ramos, Nilza Patrícia III. Título

CDD. 633.61

SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA
DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO AGRONÔMICO
Pós-Graduação
Av. Barão de Itapura, 1481 Caixa Postal 28
13001-970 Campinas, SP - Brasil
(19) 2137-0601
pgiac@iac.sp.gov.br

INSTITUTO AGRONÔMICO

Curso de Pós-Graduação

Agricultura Tropical e Subtropical

Certificado de Aprovação

Título: **Decomposição da palha de cana-de-açúcar em função da quantidade aportada e da aplicação de vinhaça**

Aluna: **Carina Sayuri Yamaguchi**

Área de Concentração: **Gestão de Recursos Agroambientais**

Processo SAA nº: **2.637/2013**

Orientador: **Dr. Cristiano Alberto de Andrade**

Aprovado pela Banca Examinadora:

Dr.Cristiano Alberto de Andrade - IAC

Dr. Márcio Koiti Chiba - IAC

Dr. Heitor Cantarella - IAC

Visto:

Márcio Koiti Chiba
Coordenador Pós-Graduação
Instituto Agronômico

Campinas, 29 de maio de 2015

DEDICO

Aos meus pais, Francisco e Cristiane, com muito orgulho, por serem exemplos de vida e superação, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha vida e foram responsáveis por transformarem meu sonho em realidade.

"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes."
Marthin Luther King

Deixem seus méritos gravados
Na história de suas contínuas vitórias!
A dificuldade no momento presente
Será a glória em seu futuro!
Daisaku Ikeda

Agradecimentos

- Ao Instituto Agronômico pela estrutura e, à Coordenação da Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, pela oportunidade.
- À Embrapa Meio Ambiente pela oportunidade e por me proporcionar toda a estrutura necessária para a realização do trabalho.
- À CAPES pelo auxílio financeiro.
- Ao meu orientador, Cristiano Alberto de Andrade, pela orientação, paciência, estímulo nas horas difíceis, pelo exemplo de caráter e dedicação, por partilhar de seus conhecimentos, por me conceder valorosos conselhos e palavras de encorajamento e, por não suprir esforços para me ajudar no término desse trabalho.
- À minha co-orientadora Nilza Patrícia Ramos, pela oportunidade neste trabalho de pesquisa, pela orientação, pela confiança, compreensão, competência, pelo exemplo de determinação e pelo incentivo na minha formação profissional.
- À Adriana M.M. Pires, por sua generosidade, pelo carinho, além dos incentivos em todos os momentos , pelas inúmeras explicações, pelas valorosas sugestões e por não poupar esforços em me ajudar.
- Às funcionárias do Central de Gases e Laboratório de Matéria Orgânica, em especial a Viviane e Juliana, pela amizade, compreensão, ensinamentos, conselhos, pelo ótimo convívio e por torná-los agradáveis e especiais, e pela disponibilidade e auxílio na execução das análises químicas, pois sem essa ajuda esse trabalho não teria essa proporção.
- Aos funcionários do Laboratório de Qualidade do Solo, em especial, a Meire, pelo aconchego de vó, pelos conselhos, pela troca de conhecimentos e auxílio nas análises físicas.
- Aos funcionários do SCE, pela amizade sólida e pelos bons momentos de convívio, Júlio, Barba, Rafaela, Henrique, Celinha, Seu Laércio, Hiram, Roberto, Chiquinho, Chacrinha, e pelas indas e vindas ao campo e a ajuda nas amostragens.
- As funcionárias do Laboratório Solos e Água, Lidiane e Cindi, pela colaboração e pelo espaço concedido para a realização desse trabalho.
- Aos funcionários da Qualidade do Solo do Instituto Agronômico, Janete, Douglas, Luciana, Sandra e Silvia, pela prestatividade e auxílio na realização das análises.
- Às funcionárias da Pós-Gradução, Célia e Carol, pela paciência e pelo atencioso atendimento.
- Aos professores da Pós-Gradução, que através dos seus ensinamentos me fizeram chegar até formação.

- À banca examinadora deste trabalho, composta pelos pesquisadores, Dr. Heitor Cantarella e Dr. Márcio Koiti Chiba, pelas considerações e contribuições.
- Aos amigos da Embrapa (estagiários e pós-graduandos), Felipe (Teló), Guilherme, Gabriel, Said, Adriano, Raíssa, Rebeca, Victor (Vitão), Regiane (Figura), Wallace, Kelvin, Rafa, Iracema, Vivi (2), Rose, Felipe, pela amizade, pelo convívio, pela ajuda de todos e por fazerem os momentos de muito trabalho se tornarem agradáveis, e em especial ao Rodrigo (Dom Pedro), por sua amizade, pelas inúmeras conversas e pelo apoio sempre que precisei, a Priscila, pelo carinho, pela sábias dicas e explicações espontâneas e divertidas e, Cristina, pelas explicações e por seu esforço em me ajudar no que fosse preciso nesse trabalho.
- Aos amigos da Pós-Graduação, Laura, Renan, Letícia, Rodrigo, Magno, Rafa, Rimena, Marilza, Jonas e Agmon, pela amizade, por partilharem de todos os momentos dedicados ao mestrado, pela troca de conhecimentos, pelos inúmeros dias de trabalhos e estudos, pela ajuda, e é claro, pelas saidinhas esporádicas recheadas de muita alegria.
- Aos amigos distantes, porém sempre presentes, Marina, Luma, Juliana, Rafael (Japonêis) e Fabiana (Fabi), pela amizade, por estarem comigo em todos os momentos e por me incentivarem a jamais desistir dos meus objetivos.
- À toda a minha família, em especial aos meus pais, Cristiane e Francisco, por serem a minha base, por terem a paciência de me educar e por não suprirem esforços para me dar o melhor em todos os sentidos, aos meus irmãos, Daniel e Caroline, e aos meus avós, Kioko e Akiyoshi (in memorian) e Sumika e Noboru (in memorian), por me incentivarem a nunca desistir e sim persistir nos meus sonhos, independente do quão difícil fosse à trajetória, pois no final tudo valeria a pena e teria o seu devido valor.
- A todos os demais familiares e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram durante a caminhada acadêmica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
RESUMO xi
ABSTRACT xii
1 INTRODUÇÃO 1
2 REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1 A produção de cana-de-açúcar e a questão da palha 3
2.2 Mineralização da palha de cana-de-açúcar 5
3 MATERIAL E MÉTODOS 10
3.1 Decomposição da palha de cana-de-açúcar no campo 10
3.2 Decomposição da palha de cana-de-açúcar em condições controladas 16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 21
4.1 Decomposição da palha de cana-de-açúcar no campo em função de quantidades iniciais depositadas sobre o solo 21
4.1.1 Decomposição da palha e mineralização do carbono 21
4.1.2 Carboidratos estruturais da palha de cana-de-açúcar 27
4.1.3 Considerações Finais 30
4.2 Decomposição da palha de cana-de-açúcar com ou sem aplicação de vinhaça 34
5 CONCLUSÕES 47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluvial durante o período experimental que compreendeu as safras 2011/12 e 2012/13 em Araras-SP. 11

Figura 2. Sacos de decomposição de 0,75 m x 0,50 m contendo palha de cana-de-açúcar em quantidades correspondentes a 25% (2,8 t ha^{-1}), 50% (5,7 t ha^{-1}), 75% (8,5 t ha^{-1}) e 100% (11,3 t ha^{-1}) do produzido na safra 2011/12. 12

Figura 3. Detalhe da retirada da palhada recém aportada sobre o solo para colocação do saco de decomposição transportado até o campo em embalagem de polietileno (A); e vista geral dos sacos instalados nas duas entrelinhas centrais da parcela (B). 13

Figura 4. Vista geral dos tratamentos com 240 mg cm^{-2} de palha (A); detalhe da rede de polietileno com malha de diâmetro de 2 mm colocada na superfície da palha (B) ou do solo (C) para evitar o contato direto entre o copo com solução de NaOH e o material incubado; e vista geral das unidades experimentais com 160 mg cm^{-2} de palha prontas para quantificação do C-CO_2 liberado (D). 18

Figura 5: Massa seca de palha de cana-de-açúcar remanescente sobre o solo após dois ciclos de crescimento da cultura (A); e constante de velocidade do processo de decomposição em função da quantidade de palha depositada inicialmente sobre o solo (B). 21

Figura 6. Aspecto visual dos sacos de decomposição contendo palha de cana-de-açúcar remanescente após 281 dias (A) e 632 dias (B) da deposição sobre o solo. Quantidades de palha inicialmente depositadas sobre o solo referem-se a porcentagens em relação a 11,3 t ha^{-1} (100%). 22

Figura 7. Carbono remanescente na palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca) (A); e constante de velocidade de mineralização do carbono em função da quantidade de palha depositada inicialmente sobre o solo (B). 25

Figura 8. Teor de carbono na palha de cana-de-açúcar em função do tempo de decomposição. Barras verticais representam a diferença mínima significativa entre os teores médios dos carboidratos estruturais dentro de cada tempo de avaliação. 25

Figura 9. Relação C/N da palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca). 26

Figura 10. Quantidades de hemicelulose (A), celulose (B) e lignina (C) remanescentes na palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade de palha inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca). 28

Figura 11. Teores de hemicelulose (A), celulose (B) e lignina (C) na palha de cana-de-açúcar em função do tempo de decomposição. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5%, entre os teores médios dos carboidratos estruturais dentro de cada tempo de avaliação. 29

Figura 12. Esquema simplificado de decomposição, balanço de massa e aspectos qualitativos a partir de diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar deixadas sobre o solo após a colheita, aos 281 (1º ciclo) e 632 (2º ciclo) dias. 32

Figura 13. Carbono liberado na forma CO_2 (C-CO_2) em função do tempo de incubação e com ou sem aplicação de vinhaça. (A) 0 t ha^{-1} de palha, (B) 20 mg cm^{-2} (2t ha^{-1} de palha), (C) 40

mg cm^{-2} (4 t ha^{-1} de palha), (D) 80 mg cm^{-2} (8 t ha^{-1} de palha), (E) 160 mg cm^{-2} (16 t ha^{-1} de palha) e, (F) 240 mg cm^{-2} (24 t ha^{-1} de palha). 34

Figura 14. Carbono acumulado na forma de CO_2 (C-CO_2), em função das quantidades de palha de cana-de-açúcar (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) e o efeito com e sem aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa entre C-CO_2 acumulado dentro de cada tempo de avaliação. 36

Figura 15. Carbono acumulado na forma de CO_2 (C-CO_2), em função das quantidades de palha de cana-de-açúcar (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) e dentro de cada tempo de avaliação (15, 30, 60, 120 e 240 dias). 37

Figura 16. Carbono acumulado na forma de CO_2 (C-CO_2) em função do tempo e das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) adicionadas sobre a superfície do solo. (A) 20 mg cm^{-2} de palha (2 t ha^{-1}), (B) 40 mg cm^{-2} de palha (4 t ha^{-1}), (C) 80 mg cm^{-2} de palha (8 t ha^{-1}), (D) 160 mg cm^{-2} de palha (16 t ha^{-1}) e, (E) 240 mg cm^{-2} de palha (24 t ha^{-1}). 38

Figura 17. Massa seca remanescente da palha de cana-de-açúcar em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) aportadas inicialmente e da aplicação ou não de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as quantidades médias de massa seca remanescente nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 39

Figura 18. Taxa de decomposição da palha de cana-de-açúcar degradada em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as taxas de decomposição da palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 39

Figura 19. Carbono remanescente da palha de cana-de-açúcar em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça, adicionada ao solo após 240 dias de incubação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5% entre as quantidades médias da massa seca remanescente de palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça..... 40

Figura 20. Carbono no solo em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e com e sem aplicação de vinhaça após 240 dias de incubação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre os teores médios do carbono no solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 41

Figura 21. Balanço de massa do carbono no solo em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação de vinhaça, com e sem a aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre os balanços médios de carbono no solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça..... 41

Figura 22. Correlação entre o teor de carbono do solo e o balanço de massa de carbono estimado em função dos aportes desse elemento via palha e vinhaça, da saída como C-CO_2 e do estoque na massa seca de palha remanescente (Balanço de C = ($C_{palha\ inicial} - C_{palha\ final}$) + $C_{vinhaça}$ − C-CO_2). Sem aplicação de vinhaça (A). Com aplicação de vinhaça (B)..... 42

Figura 23. Carbono total em função das quantidades de palha (0, 20, 40 80, 160 e 240 mg cm^{-2}). (A) Somatório do carbono inicial (C $palha_{inicial}$ + C $do\ solo_{inicial}$) e final (C $palha_{final}$ + C $solo_{final}$ + C-CO_2 $acumulado_{240\ dias}$), sem aplicação de vinhaça. (B) Somatório do carbono inicial (C palha inicial + C vinhaça + C do solo inicial) e final (C palha final + C solo final + C-CO2 acumulado 240 dias), com aplicação de vinhaça. Valores acima das barras verticais representam o erro padrão entre o Inicial e o Final. 42

Figura 24. Nitrogênio remanescente na palha de cana-de-açúcar após 240 dias, em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça, adicionada ao solo. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as quantidades médias de nitrogênio remanescente na palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 43

Figura 25. Relação carbono/nitrogênio da palha de cana-de-açúcar após 240 dias de incubação em função da quantidade de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) adicionada ao solo e, com e sem aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre relação C/N média da palha remanescente da palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça..... 44

Figura 26. Relação carbono/nitrogênio no solo após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}), sem e com aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% da relação C/N média do solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 45

Figura 27. Nitrogênio no solo na forma de N-NO_3^- após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}). 45

Figura 28. Nitrogênio no solo na forma de N-NH_4^+ após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}), sem e com aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% da média do N-NH_4^+ do solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça. 46

Figura 29. Nitrogênio inorgânico no solo, somatório da forma de N-NO_3^- e N-NH_4^+ após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}). 46

Decomposição da palha de cana-de-açúcar em função da quantidade aportada e da aplicação de vinhaça

RESUMO

A manutenção da palha de cana-de-açúcar no campo pode representar, em médio-longo prazo, incrementos na matéria orgânica do solo e alterações na ciclagem de nutrientes, governados parcialmente pelo processo de decomposição da palha. O objetivo deste trabalho foi avaliar a decomposição da palha de cana-de-açúcar influenciada pelas quantidades aportadas no campo e também pela aplicação ou não de vinhaça sob condições controladas. O experimento de campo foi constituído por quatro tratamentos (2,8; 5,7; 8,5; 11,3 t ha^{-1} de palha) avaliados durante dois ciclos. Foram determinadas as taxas de decaimento da biomassa e do carbono, a relação C/N e os carboidratos estruturais. Em condições controladas, durante 240 dias, foram avaliados cinco tratamentos com palha (equivalentes a 2, 4, 8, 16 e 24 t ha^{-1}), com e sem adição de vinhaça. Neste experimento avaliaram-se a liberação de C-CO_2, a massa seca, o C e o N remanescentes, os teores de C e N no solo e relação C/N da palha e do solo. No campo a taxa média de decomposição da palha foi igual a 66% (relação C/N entre 34/1 e 46/1) no final do primeiro ciclo e igual a 91% (relação C/N de 20/1) ao final do segundo ciclo, sem efeito da quantidade de palha inicialmente aportada. O processo de decomposição correspondeu a reduções nos teores de celulose e hemicelulose, enquanto houve concentração de lignina no material remanescente. Em condições controladas a taxa de decomposição da palha também não variou com a quantidade inicialmente mantida sobre o solo. A palha nos tratamentos com aplicação de vinhaça apresentou taxa de decomposição entre 70 e 94%, enquanto nos tratamentos sem vinhaça esse valor ficou entre 68 e 75%. A liberação de C-CO_2, entretanto, foi menor nos tratamentos (16 e 24 t ha^{-1} de palha) com vinhaça, comparativamente aos que não receberam essa aplicação, o que foi indicativo de maior estabilização de C no solo, posteriormente confirmada pelos teores totais de C no solo e por meio de balanço de massa.

Palavras-Chave: mineralização do carbono, mineralização do nitrogênio, carboidratos estruturais, celulose, hemicelulose e lignina.

Sugar cane straw decomposition in function of quantity input and vinasse addition

ABSTRACT

Sugar cane straw maintenance on soil surface after harvesting could represent in medium-long term soil organic matter increase and alterations on nutrients cycling, which is partially regulated by straw decomposition process. The objective of this study was to evaluate sugar cane straw mineralization influenced by different input quantities on the field and vinasse application under controlled conditions. The field experiment consisted of four treatments (2.8; 5.7; 8.5; 11.3 t ha^{-1} of straw) evaluated during two growing seasons. There were analyzed biomass decay and reminiscent carbon rates (%), C/N ratio and structural carbohydrates. In controlled conditions there were evaluated, during 240 days, five treatments: 2; 4; 8; 16 e 24 t ha^{-1} of straw, with and without vinasse addition. On this experiment there were evaluated: C-CO_2 release; C mineralization rate of the straw; dry mass, carbon and nitrogen reminiscent and C/N ratio of straw and soil. In the field dry mass decomposition rate was 66% (C/N rate between 34/1 and 46/1) at the end of first-cycle of the field study and 91% (C/N rate equal to 20/1) at the end of second-cycle, independently of straw quantities initially inputted. Decomposition process corresponded to cellulose and hemicellulose concentrations decrease and lignin concentration on reminiscent material. In controlled conditions, decomposition rate did not vary with straw quantities initially maintained on the soil surface. Treatments with vinasse addition presented straw decomposition rate between 70 and 94%, while treatments without vinasse presented rates between 68 and 75%. However, treatments with vinasse (16 and 24 t ha^{-1} of straw) released less CO_2 than treatments without the residue, indicating higher stabilization of soil carbon, which was confirmed by total soil carbon and mass balance.

Keywords: carbon mineralization, nitrogen mineralization, structural carbohydrates, cellulose, hemicellulose and lignin.

1 INTRODUÇÃO

O aporte de resíduos culturais em sistemas de produção com mínimo revolvimento do solo, como o cultivo mínimo e o plantio direto, tem sido associado à maior estabilidade de produção no tempo e, em médio-longo prazo, a incrementos na produtividade, redução das perdas de solo por erosão, economia no uso de fertilizantes e aumento dos teores de matéria orgânica do solo, dentre outros.

Para a cana-de-açúcar, do qual o Brasil é o maior produtor mundial e o Estado de São Paulo desempenha papel de destaque nesse sentido, os resíduos culturais passaram a ter importância com o fim da queima na pré-colheita e implementação da colheita mecanizada. Neste sistema o aporte de palha varia entre 10 e 30 t ha^{-1} ano^{-1}, o que representa quantidade expressiva de carbono (C) e a possibilidade de ciclagem de nutrientes no sistema. No entanto, com a procura por fontes renováveis de energia e uma alteração no foco das usinas e/ou grandes grupos empresariais, que incorporaram em sua atuação a produção de “bioenergia”, a palha passou a ser considerada insumo. Em uso exclusivo, ou em conjunto com o bagaço, a palha pode ser queimada para a produção de eletricidade e/ou utilizada na produção de etanol de segunda geração.

O valor da palha na indústria como insumo para bioenergia pode ser estimado de forma relativamente simples, enquanto o valor no campo está relacionado com os potenciais benefícios/prejuízos no sistema agrícola, ainda pouco conhecidos. Dessa forma, a decisão pela retirada ou não da palha, ou ainda a definição da quantidade de palha a ser deixada no campo, deve passar antes pela compreensão dos processos relacionados com a interação da palha com o solo, cultura e fatores ambientais, como temperatura, aeração e umidade. Um aspecto essencial nesse sentido refere-se ao processo de decomposição da palha ao longo do tempo, uma vez que a maior parte dos benefícios da palha relaciona-se, de alguma forma, com a presença de barreira física na superfície do solo e com o processo de mineralização dos compostos orgânicos.

A mineralização da palha de cana-de-açúcar no solo também depende da sua qualidade, especialmente da relação C/N e dos carboidratos estruturais, como celulose, hemicelulose e lignina. Considerando que a palha da cana apresenta relação C/N acima de 80, espera-se que sua decomposição no campo seja relativamente lenta, mas algumas dúvidas surgem quanto ao efeito da própria quantidade depositada sobre o solo. A manutenção da umidade em valores favoráveis a atividade microbiana no solo deve variar com a quantidade de palha depositada, o que também reflete no processo de decomposição. Adicionalmente, a

cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, com ciclos produtivos de rebrota em que há deposição de palha do ano sobre palha residual de ano(s) anterior(es), o que certamente contribui para a complexidade do sistema.

Outro aspecto que merece destaque diz respeito ao uso de torta de filtro e vinhaça em conjunto com a manutenção da palha. Especificamente para o caso da vinhaça, com teor de N entre 0,028 a 0,9 kg m^{-3} e considerando-se uma dose média de 200 m^3 ha^{-1}, o aporte desse nutriente pode ser expressivo, variando de 18 a 80 kg ha^{-1}. Tais quantidades de N aplicadas via vinhaça podem alterar a relação C/N da palha, principalmente se houver recolhimento parcial deste material para utilização na usina.

Considerando-se que há demanda de palha pela usina para fins energéticos e que os benefícios associados à manutenção desse material no campo dependem do processo de decomposição, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a mineralização da palha de cana-de-açúcar influenciada pela quantidade mantida sobre o solo e pela aplicação de vinhaça.

Diante o exposto, a presente pesquisa teve por objetivos específicos:

i. Caracterizar o processo de decomposição da palha de cana-de-açúcar através do modelo da equação da cinética química de primeira ordem;

ii. Determinar as alterações dos carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose) e lignina da cana-de-açúcar;

iii. Avaliar o balanço de massa do carbono no solo;

iv. Determinar a disponibilidade de nitrogênio.

Hipóteses:

i. A taxa de decomposição da palha é inversamente proporcional à quantidade da massa mantida sobre o solo no campo.

ii. A aplicação de vinhaça incrementa a decomposição da palha em condições controladas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A produção de cana-de-açúcar e a questão da palha

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial na produção de cana-de-açúcar, sendo o maior produtor da cultura, seguido da Índia e China, no qual foram produzidos na última safra (2013-2014) aproximadamente 660 milhões de toneladas de colmos de cana-de-açúcar em aproximadamente 9,1 milhões de hectares (CONAB, 2014). O estado de São Paulo é o maior produtor nacional, sua participação equivale a 51% de área plantada, ou seja, cerca de 4,7 milhões hectares (UNICA, 2014).

Além do açúcar e do etanol, o bagaço e, mais recentemente, a palha também passaram a agregar valor dentro do processo produtivo da agroindústria sucroalcooleira, pois representam fontes importantes para a geração de energia (DIAS et al., 2009). Atualmente a biomassa de cana é a principal fonte bioenergética do país, estratégica na diversificação da matriz energética e na redução do uso de combustíveis fósseis (CENBIO, 2011).

A palha de cana como insumo na produção de energia é função do crescimento da colheita mecanizada, que no Estado de São Paulo evoluiu de 37% da área colhida em 2004 (SMEETS et al., 2008) para 80 - 83% em 2014 (ROSSETTO et al., 2013; UNICA, 2014). A alteração no processo de colheita foi estimulada pela restrição à queima ou despalha a fogo, principalmente devido aos impactos ambientais negativos dessa prática, como a emissão de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e liberação de partículas e aerossóis capazes de provocar doenças respiratórias (ANDREAE & MERLET, 2001; GONÇALVES, 2003; CERRI et al., 2007). Além disso, a queima da palha deixa o solo exposto as intempéries (LUCA et al., 2008), conduzindo, dentre outros aspectos, à diminuição dos teores de matéria orgânica (CANELLAS et al., 2003).

O governo do Estado de São Paulo decretou (Decreto nº 47.700) em 11 de março de 2003, regulamentou a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradual da queima antecedendo a colheita da cana, com total extinção prevista para o ano de 2021 em áreas mecanizáveis e 2031 para não mecanizáveis (SÃO PAULO, 2003). Mais recentemente, São Paulo incentivou o uso da palha de cana em processos industriais para produção de energia, em que o decreto nº 57.042, de 06 de junho de 2011 (SÃO PAULO, 2011), que desonera a aquisição de bens de capital destinados à produção de energia elétrica a partir de biomassa resultante da industrialização (bagaço) e de resíduos (palha) de cana-de-açúcar.

A queima anterior a colheita representa perda de aproximadamente 30% do total de biomassa produzida por área (RIPOLI et al., 1991), a qual poderia ser utilizada para cogeração de energia nas usinas (energia renovável) e/ou para produção de etanol de segunda geração (ROSSETTO et al., 2013).

A manutenção da palha no campo, entretanto, pode, à semelhança de outros sistemas produtivos com deposição de resíduos vegetais, ser fundamental na manutenção ou no aumento da qualidade do solo (SIX et al., 2002). A matéria orgânica do solo é considerada atributo chave na qualidade do sistema edáfico (DORAN & PARKIN, 1994; SEYBOLD et al., 1998) e sua manutenção em níveis adequados depende do balanço entre entradas e saídas, em que a quantidade de palha de cana deixada sobre o solo após a colheita pode ser importante.

No sistema de colheita com queima, em que não há a manutenção da palha, é esperada redução nos teores de matéria orgânica do solo em longo prazo, comparativamente ao solo sob cobertura vegetal original (DOMINY et al., 2002; OSHER et al., 2003; GALDOS et al., 2009).

Com aportes variando entre 10 e 30 t ha^{-1} ano^{-1} de massa seca (ABRAMO FILHO et al., 1993; TRIVELIN et al., 1995; VITTI et al., 2007), a manutenção da palha no solo pode contribuir para o aumento de carbono no solo (CANELLAS et al., 2003; GALDOS et al., 2009). CANELLAS et al. (2010) observaram aumento no teor de carbono do solo, principalmente na camada superficial (0-20 cm) após 55 anos de colheita da cana sem queima. De acordo com RAZAFIMBELO et al. (2006) houve aumento de 20% e de 15% nos teores de carbono do solo para as camadas de 0-5 e de 0-10 cm respectivamente, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com manutenção da palha sob o solo.

Além dos efeitos na matéria orgânica do solo, a manutenção da palha de cana no campo pode reduzir a necessidade de fertilizantes em médio e longo prazo (UNICA, 2008; THORBURN et al., 2012), diminuir a amplitude térmica no solo (DOURADO-NETO et al., 1999), manter a umidade mais favorável à produção da cultura (MARIN et al., 2014), controlar perdas de solo por erosão (SPAROVEK & SCHNUG, 2001; ROSSETTO et al.; 2008; MARTINS FILHO et al., 2009), dentre outros aspectos.

A alteração do componente biológico também é relatada em áreas com palha mantida sob o solo, com predominância de microorganismos decompositores, principalmente fungos como *Aspergillus, Trichoderma* e *Penicillium*, e bactérias como *Zymomonas* e *Cellulomonas* (FORTES et al., 2012), uma vez que usam este resíduo como fonte de carbono, energia e nutrientes (WOOD, 1991).

Aspectos menos favoráveis em relação à manutenção da palha no solo também são citados na literatura, como falha na brotação e maior probabilidade de ocorrência de incêndios (ROSSETTO et al., 2008), além do aumento na incidência de pragas e doenças (FURLANI NETO, 1994).

De qualquer forma, tanto os benefícios relacionados com a proteção física do solo pela localização superficial da palha, como os benefícios associados à matéria orgânica, atividade biológica e ciclagem de nutrientes dependem do processo de decomposição da palha no campo, sendo o conhecimento desse processo fundamental na decisão de retirada ou não da palha ou determinação da quantidade a ser mantida no campo (retirada parcial da palha). Ressalta-se quanto ao último aspecto mencionado que o setor sucroenergético trabalha com a possibilidade ideal de retirada parcial da palha, ou seja, com o suficiente para a geração de energia na usina, concomitantemente ao alcance dos benefícios agronômicos e ambientais no campo.

2.2 Mineralização da palha de cana-de-açúcar

A decomposição da palha de cana-de-açúcar e os potenciais benefícios advindos desse processo variam em função de fatores relacionados a própria palha, ao solo, ao clima e as práticas de manejo. A decomposição depende da variedade da cana, da composição química da palha (carboidratos estruturais) e da relação C/N (NG KEE KWONG et al., 1987; SIQUEIRA & FRANCO, 1988; OLIVEIRA et al., 1999, OLIVEIRA et al., 2002). Em relação ao solo, a mineralização varia com o tipo de solo (KLIEMANN et al., 2006), com o teor de matéria orgânica (BLACK, 1968; JANSON & PERSON, 1982), com o pH, com a temperatura, umidade (MYERS et al., 1994; DOURADO-NETO et al., 1999) e da aeração (BALL COELHO et al., 1993; SOUZA et al., 2005).

Dessa maneira, o contato da palha com o solo influencia o processo de decomposição pelos microrganismos e pela macrofauna edáfica (ABIVEN et al., 2005; SINGH et al., 2008). Além disso, as condições climáticas (ALVARENGA et al., 2001; KLIEMANN et al., 2006), relacionadas com a disponibilidade hídrica e de oxigênio (OLIVEIRA et al., 1999; JENSEN et al., 2005; AUSTIN & BALLARÉ, 2010) também influenciam a dinâmica de decomposição da palha (CAMPOS, 2003).

A decomposição da palha ou mineralização do carbono da palha de cana foi avaliada em alguns trabalhos no Brasil (ABRAMO FILHO, 1995; OLIVEIRA et al., 2002; CAMPOS, 2003; VITTI et al., 2008; FORTES, 2010; AQUINO, 2012; ZOTELLI, 2012; BENEDETTI,

2014; DIETRICH, 2014) e de modo geral, valores entre 20 e 70% da perda de massa em relação à massa inicial (taxa de mineralização do carbono) foram encontrados para um ciclo de soca. Para se ter uma ideia, a partir da quantidade inicial de 6,26 t ha^{-1} de carbono presente na massa seca da palha de cana-de-açúcar, o valor da taxa de mineralização de carbono obtido foi de 41% em um ciclo de soca (OLIVEIRA et al., 1999). Já FARONI et al. (2003) observaram que para o aporte inicial de 6,10 t ha^{-1} de carbono na massa seca da palha, provavelmente, taxa de mineralização foi igual a 61%. Os resultados obtidos nesses estudos são variáveis, em função das diferenças edafoclimáticas e da qualidade da palha citados anteriormente.

ZOTELLI (2012) avaliou a decomposição da palha de cana-de-açúcar em três quantidades (7, 14 e 21 t ha^{-1} de massa seca) com e sem adição de vinhaça. A autora obteve taxas de mineralização do carbono de 32, 39 e 52% para as quantidades de palha avaliadas sem adição de vinhaça e de 36, 36 e 45% para as quantidades com adição de vinhaça, as quais foram diretamente proporcionais às quantidades de palha aportada ao solo. Comportamento semelhante foi observado por AQUINO (2012), em que as maiores taxas de decomposição foram observadas para as maiores quantidades de palha. Neste estudo, as taxas de decomposição observadas foram de 53, 61, 80 e 80% para 5, 10, 15 e 20 t ha^{-1} de massa seca de palha, respectivamente.

O efeito da umidade do solo no processo de decomposição da palha de cana-de-açúcar também deve ser considerado. A relação entre a quantidade de palha mantida sobre o solo e a taxa de mineralização desse resíduo é devido à manutenção da umidade favorável à atividade biológica do solo por mais tempo em virtude da maior quantidade de palha sobre o solo (FREITAS et al., 2004). OLIVEIRA et al. (2002) avaliaram a decomposição da palha de cana-de-açúcar em dois ambientes agrícolas e observaram valores de massa seca da palha variando de 30% aos 330 dias a 78% aos 360 dias, atribuindo tal diferença à umidade do solo.

A temperatura também é determinante na predominância/dinâmica das comunidades microbianas responsáveis pelo processo de decomposição da palha (BENEDETTI, 2014). A temperatura do solo pode ser reduzida em 8 ºC até 6 cm de profundidade em função da palha de cana-de-açúcar deixada sobre o solo (TIMM, 2002). Desse modo, a temperatura em conjunto com a precipitação/umidade do solo pode controlar a atividade de comunidades microbianas, afetando a decomposição de compostos bioquímicos que compõe os tecidos vegetais dos resíduos aportados sobre o solo (SZAKÁCS, 2007).

A representação do processo de decomposição por modelos exponenciais demonstra que a fase inicial é intensa, em que compostos menos recalcitrantes são fontes de energia e

carbono aos microrganismos, mas com o tempo a intensidade do processo tende a diminuição, concomitantemente ao aumento da participação de compostos mais recalcitrantes (GONÇALVES et al., 2010). Essa dinâmica de decomposição é determinada parcialmente pela constituição bioquímica do material vegetal (AITA & GIACOMINI, 2003; FORTES et al., 2012), ou seja, pelas concentrações de celulose, carboidratos hidrosolúveis, proteínas, ligninas, polifenóis, etc. (GONÇALVES et al., 2010).

Em estudos com palha da cana-de-açúcar e processo de mineralização do carbono, os principais compostos bioquímicos investigados são celulose, hemicelulose e lignina, denominados carboidratos estruturais. A composição média dos carboidratos estruturais da palha de cana-de-açúcar é de 45 a 48% de celulose, 26 a 31% de hemicelulose e 7 a 20% de lignina (SINGH et al., 2008; CGEE, 2009).

A hemicelulose é constituída de polímeros contendo hexoses, pentoses e ácidos urônicos, que compõem 30% da massa seca dos resíduos vegetais, sendo de decomposição geralmente rápida (DENG & TABATABAI, 1994). A decomposição da celulose torna o carbono disponível, o que é responsável pelo aumento da atividade microbiana (DENG & TABATABAI, 1994). Assim, a hemicelulose e a celulose respondem pelo processo mais intenso da perda de massa da palha de cana e mineralização do carbono (OLIVEIRA et al., 1999; JENSEN et al., 2005).

Desse modo, a velocidade de decomposição da hemicelulose e da celulose é mais alta do que a da lignina, sendo esta última, em conjunto com o nitrogênio, apontados como agentes controladores da taxa de decomposição dos resíduos vegetais (SANGER et al., 1996). A perda de carbono da palha de cana-de-açúcar é mais evidenciada por meio da descarboxilação dos conteúdos celulares e da hemicelulose (OLIVEIRA et al., 2002). A lignina é mais resistente à decomposição por microrganismos devido à sua estrutura química mais recalcitrante, já que é formada por macromoléculas bidimensional e tridimensionais amorfas ligadas à celulose (CARVALHO et al., 2010) e no processo de decomposição da palha pode manter-se na massa remanescente (MELILLO et al., 1982; SANGER et al., 1996; CAMPOS, 2003; GONÇALVES et al., 2010), ou seja, sua concentração na massa seca deve ser alterada no tempo (GALVÃO et al., 1991, GONÇALVES et al., 2010) no sentido de incremento na medida em que a celulose e a hemicelulose são mineralizadas (CAMPOS, 2003).

O nitrogênio também é citado como importante na decomposição de resíduos vegetais (MELILLO et al., 1982; SANGER et al., 1998) e comumente é a relação C/N o

índice utilizado para relacionar o referido nutriente com a facilidade/velocidade de decomposição.

A relação C/N é relacionada com o balanço entre imobilização e mineralização do nitrogênio a partir do material vegetal deixado sobre o solo (SMITH, 1968). Resíduos com menores valores de relação C/N são decompostas mais rapidamente no solo, sendo que a mineralização líquida de nitrogênio passa a ser verificada quando valores de relação C/N encontram-se abaixo de 30/1 (CASSMAN & MUNNS, 1980; VITTI et al., 2008; TASCA, 2009). O valor de 30/1 é proveniente da estequiometria do processo aeróbio de respiração, em que dois terços do carbono contido no material orgânico será liberado como CO_2 para cada um terço fixado na biomassa microbiana (VICTORIA et al., 1992; LOPES et al., 2004).

Entretanto, o inverso pode ocorrer quando a relação C/N é superior a 30/1, ou seja, predominância de imobilização do nitrogênio (CASSMAN & MUNNS, 1980; VITTI et al., 2008), inclusive reduzindo a disponibilidade desse nutriente para as plantas (VITTI et al., 2007). Ao considerar a cana-de-açúcar, CAMPOS (2003) verificou equilíbrio entre mineralização e imobilização de nitrogênio na palha em relação C/N igual a 17:1.

Com base na relação C/N entre 80/1 e 100/1 da palha de cana-de-açúcar (LYNCH, 1986; ROSSETTO et al., 2013) observa-se que o limitado teor de nitrogênio pode determinar a menor velocidade de decomposição da palha (GALVÃO et al., 1991; SOUTO et al., 2009; MELILLO et al., 1982; SANGER et al., 1998) e menor entrada de C no solo. Por esse motivo, práticas de manejo que aportem nitrogênio e, potencialmente, reduzam a relação C/N da palha, tais como aumento da dose de fertilizante nitrogenado (ALEXANDER, 1967), aplicação de vinhaça, alteração da relação folhas secas/folhas verdes, etc., poderiam resultar em maior velocidade de mineralização da palha e, consequentemente, aumento da disponibilidade de nitrogênio às plantas e entrada de C no sistema.

A vinhaça possui carbono solúvel e nitrogênio em quantidades passíveis de alteração da dinâmica da matéria orgânica no sistema produtivo, principalmente ao se considerar a palha de cana-de-açúcar, rica em lignina e com baixo teor de nitrogênio. Assim, a manutenção da palha no solo e a adição de vinhaça podem ser consideradas estratégicas para manter ou aumentar a fertilidade do solo em longo prazo em cultivos de cana-de-açúcar (CANELLAS et al., 2003).

A aplicação de vinhaça, com teores variáveis de nitrogênio e cujo aporte pode alcançar 180 kg ha^{-1} pode influenciar a decomposição da palha de cana-de-açúcar (PENATTI, 1999; VITTI, 2003). A adição de vinhaça juntamente com a adubação nitrogenada elevou a decomposição da palha de cana-de-açúcar (PENATTI, 1999). Outros autores verificaram

aumento na produtividade com a aplicação de vinhaça e adubo nitrogenado (ORLANDO FILHO & LEME; 1984; RODRIGUES et al., 1984; PENATTI & FORTI, 1997).

No entanto, o efeito da aplicação da vinhaça no processo de decomposição da palha de cana-de-açúcar ainda não é conclusivo. PENATTI (1997) verificou que a adição de vinhaça acelerou o processo de decomposição da palha de cana. Entretanto, OLIVEIRA et al. (1999), CANELLAS et al. (2003) e ZOTELLI (2012) não observaram grande influência na decomposição da massa seca da palha de cana quando se adicionou vinhaça ao cultivo da cana-de-açúcar. Em parte, tais diferenças de resposta podem ser em função da variabilidade de condições climáticas na época de aplicação da vinhaça, além da própria composição da palha e da vinhaça utilizada. Procedimentos sob condições controladas de temperatura e umidade podem favorecer a observação do processo de decomposição da palha de cana-de-açúcar e o efeito da adição da vinhaça no processo, sendo, portanto, um passo importante no entendimento da dinâmica de decomposição.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa envolveu dois estudos, um feito sob condições de campo e outro em condições controladas de laboratório.

No campo foi caracterizado o processo de mineralização da palha mantida sobre o solo após a colheita, com ênfase na quantidade de palha inicialmente depositada, na mineralização do carbono e nas alterações dos carboidratos estruturais. Este estudo é parte de proposta de pesquisa mais ampla denominada “Manejo sustentável da palhada de cana-de-açúcar para otimização da produção de energia”, resultante da parceria entre Embrapa e Petrobrás.

Em laboratório o foco do estudo foi a interação entre quantidade de palha depositada e uso ou não de vinhaça, com ênfase no balanço de carbono do sistema a partir dos aportes via palha e vinhaça e das perdas como C-CO_2.

Na sequência os estudos são detalhados.

3.1 Decomposição da palha de cana-de-açúcar no campo

O estudo da decomposição da palha de cana-de-açúcar sob condições de campo foi conduzido em área experimental localizada nas coordenadas 22º21´37´´ S - 47º22´47´´ O, na Fazenda São Rafael, pertencente à Usina São João, no município de Araras-SP.

A área experimental possui declividade inferior a 4% e é cultivada com cana-de-açúcar há mais de dez anos. No período de avaliação, entre setembro de 2011 e setembro de 2013, encontrava-se com a variedade RB84-5210, em terceira e quarta socas, safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente.

O clima do local é o Cwa - tropical de altitude com inverno seco e temperatura no mês mais quente superior a 22^{o}C – segundo classificação de Köppen. No mês mais seco a precipitação total é de 14 mm, enquanto no mês mais chuvoso chega a 380 mm (ROLIM et al., 2007). A precipitação para o período experimental, entre setembro de 2011 e setembro de 2013, é apresentada na Figura 1.

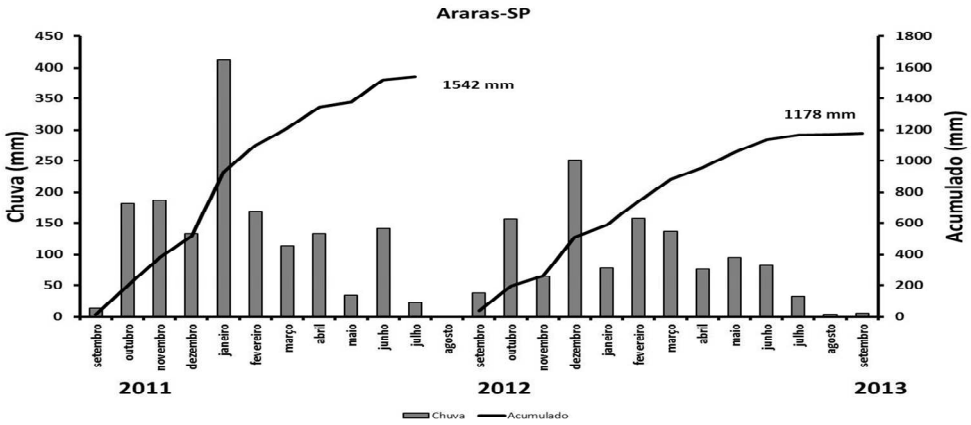


Figura 1. Precipitação pluvial durante o período experimental que compreendeu as safras 2011/12 e 2012/13 em Araras-SP.

O solo da área é classificado (SANTOS et al., 2006) como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (SIBCS, 2013), textura argilosa, 77% de argila (CAMARGO et al., 1996).

Antes da instalação do experimento foi realizada amostragem de solo da camada 0-10 cm de profundidade para análise de atributos de fertilidade, conforme métodos apresentados em RAIJ et al. (2001), sendo os resultados (média ± desvio padrão): pH_{CaCl2} = 5,0 ± 0,1; MO = 38 ± 2 g dm^{-3}; P_{resina} = 24 ± 2 mg dm^{-3}; K = 3,6 ± 1,3 $mmol_c$ dm^{-3}; Ca = 46 ± 1 $mmol_c$ dm^{-3}; Mg = 23 ± 2 $mmol_c$ dm^{-3}; H+Al = 48 ± 6 $mmol_c$ dm^{-3}; V = 59 ± 3%.

O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso (4), com cinco tratamentos correspondentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da palha depositada na superfície do solo após a colheita. Cada parcela experimental foi constituída de oito linhas de cana com 15 m de comprimento e espaçamento entrelinhas de 1,5 m, num total de 180 m^2.

A massa de palha correspondente a cada tratamento foi definida a partir da quantificação do total de palha depositada sobre o solo após a colheita da segunda soca. Para isso utilizou-se quadrado de metal com área interna de 0,25 m^2 (0,50 x 0,50 m), arremessado aleatoriamente 9 vezes em cada parcela e cuja palha localizada no interior do quadrado foi recolhida para posterior secagem e pesagem.

O valor médio de palha produzida na segunda soca foi de 11,3 t ha^{-1} em base seca, sendo os tratamentos 25, 50, 75 e 100% correspondentes a 2,8; 5,7; 8,5 e 11,3 t ha^{-1} de palha, além do tratamento controle sem palha. É importante mencionar que o controle não foi utilizado no presente estudo em função dos objetivos propostos.

O método escolhido para avaliação do processo de decomposição da palha foi o de "sacos de serrapilheira" ou "sacos de decomposição" ("*Litter bags*"), adaptado de BOCOK &

GILBERT (1975) e já utilizado na cultura da cana-de-açúcar por FARONI et al. (2003), ROBERTSON & THORBURN (2007), VITTI et al. (2008) e FORTES (2010). O método se fundamenta na alteração da massa seca ou da composição química da palha em função do tempo, utilizando-se para isso sacos especialmente confeccionados para encerrar em seu interior quantidades iniciais conhecidas de palha.

No presente estudo os sacos de decomposição foram confeccionados em material plástico nas dimensões 0,50 m x 0,75 m, com malha de 15 mm, seguindo o descrito em FORTES et al. (2012).

A palha utilizada para preenchimento dos sacos foi proveniente da colheita da cana de segunda soca na área experimental e adjacências. Quantidade suficiente de palha foi recolhida do campo, seca em casa de vegetação (temperatura média de 30^{o}C) por 72 horas e homogeneizada antes de se proceder a pesagem para o interior dos sacos.

Os sacos foram preenchidos com quantidades pré-definidas de palha correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% do total de palha produzida (11,3 t ha^{-1}), ou seja, 98, 200, 299 e 397 g saco^{-1}, respectivamente (Figura 2).

Figura 2. Sacos de decomposição de 0,75 m x 0,50 m contendo palha de cana-de-açúcar em quantidades correspondentes a 25% (2,8 t ha^{-1}), 50% (5,7 t ha^{-1}), 75% (8,5 t ha^{-1}) e 100% (11,3 t ha^{-1}) do produzido na safra 2011/12.

A palha utilizada foi caracterizada quimicamente quanto aos teores de C e N por meio de combustão a seco em analisador elementar CN, modelo TruSpec CN LECO® (Leco, St Joseph, MI, USA), e os carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose) e lignina foram quantificados conforme VAN SOEST (1963). Os resultados, em base seca para os teores, foram: 469,8 g kg^{-1} de C; 4,7 g kg^{-1} de N; relação C/N de 100; 388,3 g kg^{-1} de celulose; 359,8 g kg^{-1} de hemicelulose e 101,6 g kg^{-1} de lignina.

A instalação dos sacos de decomposição foi realizada em 26 de setembro de 2011, sendo alocados 14 sacos por parcela, o que corresponde a 56 sacos por tratamento. Para o transporte dos sacos até o campo foram utilizadas embalagens plásticas individuais para prevenir contra perdas (Figura 3A).

Os sacos de decomposição foram depositados sobre o solo (houve retirada da palha recém depositada em função da colheita – Figura 3A), perpendicularmente às linhas centrais de cana na parcela e de forma a ocupar uma faixa de 0,5 m de largura até o meio da entrelinha (0,75 m de comprimento) (Figura 3B).

No campo o material foi depositado com cuidado, retirando-se o resíduo recém aportado acima do solo, para que o saco de decomposição ficasse na posição referente a palha original. Os sacos foram fixados ao solo com grampos de metal para evitar movimentações.

(A) (B)

Figura 3. Detalhe da retirada da palhada recém aportada sobre o solo para colocação do saco de decomposição transportado até o campo em embalagem de polietileno (A); e vista geral dos sacos instalados nas duas entrelinhas centrais da parcela (B).

Dois sacos de cada tratamento foram coletados aos 42, 106, 162, 225 e 281 dias após a data da instalação. A retirada dos sacos de decomposição foi realizada com bastante cuidado, de modo a se evitar perda de material e/ou contaminação. Para o transporte até o laboratório, cada saco de decomposição foi acondicionado em saco de polietileno.

A limpeza do material consistiu na retirada de solo aderido junto à tela do saco de decomposição e também disperso junto ao material vegetal do interior do saco. Na sequência as amostras foram secas a 65 ºC até peso constante, em estufa com circulação forçada de ar. Para o caso de amostras contendo solo após a secagem, procedeu-se separação adicional utilizando peneira com malha de diâmetro 2 mm e posterior nova secagem a 65 ºC. Os pesos

foram anotados para a avaliação da decomposição da palha, no qual foi realizada por diferença de massa remanescente inicial e final (FORTES, 2010).

Com o objetivo de homogeneizar o material e reduzir a amostra para as análises previstas, a palha foi picada (diâmetro médio de 3 mm) utilizado-se picadeira forrageira e posteriormente quarteada. Uma parte foi armazenada como contra prova e a outra encaminhada para moagem em moinho de facas (diâmetro médio de 0,84 mm) e, em seguida, para as análises previstas.

Os teores de C e N na palha remanescente foram determinados por meio de combustão seca (Método de Dumas) em analisador elementar de CN, modelo TruSpec CN LECO® (Leco, St Joseph, MI, USA).

Os resultados de massa seca e teores de C e N foram corrigidos pelo teor de cinzas para excluir o efeito da contaminação da palha por solo. Esta correção foi feita por meio de determinações dos teores de cinzas nas amostras de palha inicial e retiradas do campo a cada tempo de avaliação, sendo a diferença de cinzas entre a amostra no tempo "t" e a amostra inicial atribuída a contaminação com solo. O teor de cinzas no material vegetal foi determinado por meio de calcinação de um grama de tecido vegetal em mufla a 700°C por 2 horas.

A determinação dos carboidratos estruturais (hemicelulose e celulose) e lignina foi realizada no Laboratório de Análises Bromatológicas e Minerais do Instituto de Zootecnia (IZ-APTA), pertencente a Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA). O método utilizado foi o de VAN SOEST (1963), conforme descrito em SILVA & QUEIROZ (2006), baseado em sequências de digestões e extrações, de modo a quantificar: i - hemicelulose pela diferença entre as fibras solúveis em detergente neutro (FDN) e as fibras insolúveis em detergente ácido (FDA); ii – lignina pelo tratamento do resíduo insolúvel do FDA com permanganato de potássio; e iii – celulose pela diferença entre FDA e lignina.

Com base na massa seca de palha remanescente e nos teores de C, N, hemicelulose, celulose e lignina foram calculadas as quantidades correspondentes desses elementos ou compostos.

Além da massa seca de palha e dos teores e quantidades dos elementos ou compostos, calculou-se a relação C/N, uma vez que esta é amplamente utilizada para caracterizar o estágio de decomposição de materiais vegetais diversos (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

A cana da safra 2011/12 foi colhida em 29 de julho de 2012, cerca de 17 dias após a última avaliação (281 dias).

A continuidade de avaliação da palha na safra 2012/13 foi realizada a partir do material vegetal remanescente dos sacos de decomposição (4 sacos/parcela) retirados aos 281 dias. Esse material foi seco a 65 ^{o}C até peso constante e permaneceu armazenado em local seco e a temperatura ambiente por 49 dias antes do retorno ao campo.

Em 30 de agosto de 2012 os sacos de decomposição (retirados aos 281 dias) foram realocados para a avaliação na safra 2012/13. Os sacos foram novamente localizados perpendicularmente à linha de plantio, de forma a ocupar o espaço entre o limite da linha e o meio da entrelinha. No espaço a ser ocupado pelo saco de decomposição, a palha recém depositada em função da colheita 2011/12 foi retirada, o saco de decomposição realocado e palha recém depositada recolocada sobre o saco de decomposição (palha sobre palha), de forma a simular o que ocorre com os cortes subseqüentes da cana-de-açúcar. Ressalta-se que a palha gerada na safra 2011/12 foi quantificada de forma semelhante ao descrito por ocasião da instalação do experimento e que quantidades correspondentes a 25, 50, 75 e 100% da palha (2,8; 5,7; 8,5 e 11,3 t ha^{-1} em base seca, respectivamente) foram mantidas nas respectivas parcelas experimentais.

Os sacos de decomposição reinstalados na safra 2012/13 foram retirados do campo após 632 dias, contados a partir da instalação no ciclo anterior e feitas as mesmas determinações realizadas nas demais datas de avaliação. Os métodos de limpeza/preparo das amostras para análise também foram semelhantes aos apresentados para as datas de avaliação do ciclo 2011/12.

Todos os tratos culturais durante o período de avaliação foram realizados conforme as práticas da usina. É oportuno destacar que houve adubação nitrogenada e potássica no início da brotação, após a colheita, em doses equivalentes a 100 kg ha^{-1} de N e 150 kg ha^{-1} de K_2O, sem movimentação da palha depositada sobre o solo. Ressalta-se que não houve irrigação ou aplicação de vinhaça e torta de filtro.

A caracterização da decomposição e demais alterações no material vegetal foi fundamentada nos valores referentes às quantidades remanescentes de palha, carbono, nitrogênio e carboidratos estruturais, além da relação C/N, em função do tempo. Para isso os resultados foram ajustados a modelo de cinética química de primeira ordem, utilizando-se o software STATISTICA 7.0 (StatSoft, Tulsa, OK, USA):

$$R = I \cdot e^{-k*t}$$

Em que:

R = massa seca de palha ou relação C/N ou quantidades de carbono, nitrogênio e carboidratos estruturais remanescentes (kg ha^{-1}) no material vegetal em decomposição no tempo t;

I = valores iniciais de massa seca de palha, relação C/N e quantidades de carbono, nitrogênio e carboidratos estruturais no resíduo vegetal deixado sobre o solo após a colheita (kg ha^{-1});

k = constante de velocidade de decomposição da palha ou de mineralização do carbono, do nitrogênio e dos carboidratos estruturais (dia^{-1}); e

t = tempo após aporte no campo (dias).

Para testar o efeito das quantidades de palha aportadas sobre o solo na velocidade do processo de decomposição, os valores de k obtidos nos ajustes matemáticos foram submetidos a análise de variância (ANOVA). No caso de efeito significativo dos tratamentos, utilizou-se regressão para explicar a variação da velocidade em função da palha inicialmente aportada. O software utilizado foi o pacote computacional, Sistema de Análise de Variância (Sisvar) (FERREIRA, 2000).

3.2 Decomposição da palha de cana-de-açúcar em condições controladas

O segundo experimento foi realizado com o objetivo de estudar a decomposição de quantidades de palha depositadas sobre o solo, sob influência ou não da aplicação de vinhaça, porém em ambiente sem limitação de umidade e temperatura, diferentemente do que ocorre no campo.

O experimento foi conduzido sob condições controladas de laboratório e foram utilizados potes de vidro com tampa de rosca de plástico e capacidade de 2,5 L (13,8 cm de diâmetro e 21,5 cm de altura) para incubação de amostras de solo e palha, com ou sem aplicação de vinhaça. Na porção superior dos potes foi utilizado filme plástico para minimizar possíveis trocas gasosas com o ambiente externo.

O solo foi coletado em data 22 de outubro de 2013, da camada 0 – 20 cm (textura argilosa, 67% de argila – CAMARGO et al., 1996) em área adjacente ao experimento de campo conduzido em Araras-SP (item 3.1). A caracterização do solo inicial para fins de fertilidade, utilizando-se os métodos descritos em RAIJ et al. (2001), revelou: pH_{CaCl2} = 4,5; MO = 30 g dm^{-3}; P_{resina} = 12 mg dm^{-3}; K = 1,4 $mmol_c$ dm^{-3}; Ca = 21 $mmol_c$ dm^{-3}; Mg = 11 $mmol_c$ dm^{-3}; H+Al = 56 $mmol_c$ dm^{-3}; e V = 37%.

Com base nos resultados de fertilidade do solo fez-se o cálculo da necessidade de calagem para elevação da saturação por bases a 60%, o que resultou na adição de carbonato

de cálcio p.a. ($CaCO_3$) em dose igual a 1 g kg^{-1}. Este solo foi em seguida incubado em vasos durante 30 dias, com umidade correspondente a 85% da capacidade máxima de retenção de água, visando a reação do carbonato e a consequente correção da acidez do solo. Após esse período o solo foi homogeneizado, seco ao ar, novamente peneirado em malha 2 mm e armazenado até a instalação do experimento. Nesse solo os atributos de fertilidade após a correção da acidez foram: pH $_{CaCl2}$ = 4,6; MO = 30 g dm^{-3}; P $_{resina}$ = 15 mg dm^{-3}; K = 1,3 $mmol_c$ dm^{-3}; Ca = 34 $mmol_c$ dm^{-3}; Mg = 14 $mmol_c$ dm^{-3}; H+Al = 41 $mmol_c$ dm^{-3}; e V = 55%.

A palha utilizada na incubação foi obtida em área comercial com a variedade da cana-de-açúcar RB86-7515, caracterizada por alta produtividade, adaptabilidade ampla e boa estabilidade, além de ser considerada rústica e ter maturação média-tardia (UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA - UDOP, 2007). A palha foi coletada manualmente em data próxima à data de colheita do talhão, de forma a separar folhas verdes (ponteiros) e folhas secas. Esse material foi seco a 40 ^oC em estufa e posteriormente limpo com auxílio de peneira para retirada de algum solo aderido, o que foi minimizado pelo tipo de amostragem no campo. Uma mistura de 25% de folhas verdes e 75% de folhas secas (massa/massa) foi realizada para compor a amostra de palha para incubação. Subamostras dessa palha foram moídas para passar em peneira com malha de 0,84 mm e encaminhadas para quantificação dos teores de C e N por meio de combustão seca em analisador elementar de CN, modelo TruSpec CN LECO® (Leco, St Joseph, MI, USA). Os resultados em base seca foram 469 g kg^{-1} de C; 5,5 g kg^{-1} de N; e relação C/N de 85.

A palha para incubação foi cortada em fragmentos de 1 a 3 cm de comprimento.

A vinhaça utilizada nesse experimento foi obtida junto a Usina Guaíra, situada no município de Guaíra-SP. A vinhaça é pura, ou seja, sem mistura de nenhum outro resíduo líquido proveniente da agroindústria. A vinhaça foi analisada quanto ao pH e teores totais de C, N, Na, e K, seguindo-se os parâmetros recomendados na Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2006). Os resultados foram 4,7 para o pH, 116 mg L^{-1} de Na, 1496 mg L^{-1} de K, 10,4 g L^{-1} de C total e 0,35 g L^{-1} de N total. As quantidades de nitrogênio e carbono adicionadas via vinhaça foram equivalentes a 70 kg ha^{-1} e 2.080 kg ha^{-1}, respectivamente.

O experimento foi montado em delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 6 x 2, sendo seis quantidades de palha na superfície do solo e com ou sem aplicação de vinhaça. Foram utilizadas três repetições de cada tratamento, num total de 36 unidades experimentais.

Cada pote recebeu 750 g de solo preparado conforme descrito anteriormente, o que resultou numa camada de solo de 5 cm no interior do pote. As quantidades de palha para

incubação com o solo foram calculadas considerando-se a área do pote utilizado (149,57 cm^2) e não a massa de solo.

As quantidades de palha colocadas sobre o solo (Figura 4A) foram 20, 40, 80, 120 e 240 mg cm^{-2} em base seca, equivalentes a 2, 4, 8, 16 e 24 t ha^{-1} de palha no campo, respectivamente. Em termos de carbono, as doses corresponderam a 9,4; 18,8; 37,5; 56,3 e 112,6 mg cm^{-2}.

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 4. Vista geral dos tratamentos com 240 mg cm^{-2} de palha (A); detalhe da rede de polietileno com malha de diâmetro de 2 mm colocada na superfície da palha (B) ou do solo (C) para evitar o contato direto entre o copo com solução de NaOH e o material incubado; e vista geral das unidades experimentais com 160 mg cm^{-2} de palha prontas para quantificação do C-CO_2 liberado (D).

Nos tratamento com vinhaça foi aplicada dose equivalente a 200 m^3 ha^{-1} de vinhaça, o que equivaleu a 150 mL kg^{-1}.

Além dos tratamentos com palha, foram incubados tratamentos com solo e solo e vinhaça, cujo objetivo foi isolar o efeito da palha nas variáveis de interesse.

A umidade no início da incubação foi ajustada para 85% da capacidade máxima de retenção de água do solo e monitorada durante o período experimental para manutenção a

70% da capacidade máxima de retenção. Nos tratamentos com vinhaça, o volume de água para ajuste da umidade foi complementar ao já aplicado na forma do referido resíduo.

Os tratamentos foram incubados no escuro e com temperatura de 28 ± 2^{o}C em sala climatizada.

A dinâmica de decomposição da palha foi estudada por meio de quantificação periódica do carbono liberado na forma de CO_2 (C-CO_2) nos tratamentos. Seguiu-se, para isso, o método apresentado em COSCIONE & ANDRADE (2006), em que o C-CO_2 liberado em cada pote reage com solução padronizada de NaOH, cuja concentração utilizada no início do período de incubação foi igual a 1 mol L^{-1} e após 141 dias de incubação reduzida a 0,75 mol L^{-1}. O volume usado de solução de NaOH em cada pote foi de 50 mL, colocado em copo plástico com volume de 80 mL, localizado sobre tela de polietileno (2 mm de diâmetro), na superfície de cada tratamento (palha ou solo – Figura 4B e 4C).

As soluções de NaOH foram preparadas com água ultrapura, grau reagente Tipo I, obtida através de sistema Milli-Q (EMD Millipore Corporation, Billerica, MA, USA).

As trocas da solução de NaOH foram realizadas diariamente nos 30 primeiros dias de incubação e espaçadas para intervalos de 5 dias no restante do período de incubação, que teve duração total de 240 dias. A solução de NaOH retirada do interior dos potes foi encaminhada imediatamente para quantificação do C-CO_2 por meio de leitura da condutividade elétrica (RODELLA & SABOYA, 1999).

Os valores de C-CO_2 liberado foram quantificados em cada data de avaliação, valores acumulados nos períodos de 15, 30, 60, 120 e 240 dias.

Com a finalidade de diagnóstico de ganho ou perda de C pelo solo, foi feito o balanço de massa utilizando-se a equação:

$$\text{Balanço de C} = (C_{\text{palha inicial}} - C_{\text{palha final}}) + C_{\text{vinhaça}} - \text{C-}CO_2$$

Em que:

Balanço de C = quantidade de carbono (mg $pote^{-1}$) acumulada ou perdida do solo;

$C_{\text{palha inicial}} - C_{\text{palha final}}$ = quantidade de carbono remanescente (mg $pote^{-1}$) na palha ao final do período de incubação;

$C_{\text{vinhaça}}$ = quantidade de carbono (mg $pote^{-1}$) adicionada ao sistema solo palha via 150 mL de vinhaça; e

C-CO_2 = quantidade total de carbono (mg $pote^{-1}$) liberado como CO_2 até o final do período de incubação.

Nesse balanço de massa o foco foi o solo e, por isso, os aportes iniciais de C via palha e/ou via vinhaça receberam sinal positivo, indicativo de potencial entrada no sistema. O C remanescente na palha e o C-CO_2 receberam sinal negativo, indicando, respectivamente, a não entrada de C no sistema e a saída de C do sistema.

O resultado de C-CO_2 liberado acumulado foi submetido a análise de variância considerando-se um fatorial com quantidades de palha inicialmente depositadas sobre o solo (6) e aplicação ou não de vinhaça (2), em esquema de parcelas subdivididas no tempo. No caso de efeito significativo das quantidades ou do tempo, foram aplicados modelos de regressão. Os modelos testados para as quantidades de palha foram linear e quadrático, enquanto que para o tempo os modelos testados foram linear e exponencial de primeira ordem. Para o uso ou não de vinhaça, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey 5%.

O software Sisvar (FERREIRA, 2000) foi o utilizado na análise de variância, teste de Tukey e ajustes aos modelos linear e quadrático, enquanto o ajuste ao modelo de cinética de primeira ordem foi realizado usando o software STATISTICA 7.0 (StatSoft, Tulsa, OK, USA).

Ao fim do experimento de incubação, 240 dias, foram adicionados 100 mL de água ultrapura, Milli-Q (EMD Millipore Corporation, Billerica, MA, USA), de modo a lavar a palha remanescente sobre o solo e transferir possíveis produtos da decomposição (compostos orgânicos solúveis e nutrientes) para o solo. Em seguida a palha remanescente foi coletada manualmente de cada pote e estes potes permaneceram abertos e em local arejado para secagem do solo.

As amostras de palha foram lavadas com água ultrapura e secas a 40 ^{o}C até massa constante. Os pesos foram anotados para o cálculo da taxa de decomposição da palha, de forma semelhante ao mostrado para a mineralização do C. Na seqüência as amostras foram moídas em moinho de facas (peneira com malha de 0,84 mm) para análise dos teores de C e N em analisador elementar modelo TruSpec CN LECO® (Leco, St Joseph, MI, USA).

Nas amostras de solo foram quantificados os teores totais de C e N, também por combustão a seco, e os teores de N inorgânico nas formas de nitrato (N-NO_3^-) e amônio (N-NH_4^+). O N inorgânico foi extraído com solução de KCl 1 mol L^{-1} e as formas nitrogenadas determinadas por destilação com arraste a vapor (CANTARELLA & TRIVELIN, 2001).

Os resultados das variáveis avaliadas na palha e no solo ao final da incubação foram submetidos a análise de variância e posterior análise de regressão (modelos linear e quadrático) para quantidades de palha e teste de Tukey 5% para comparação das médias entre os tratamentos com e sem vinhaça.

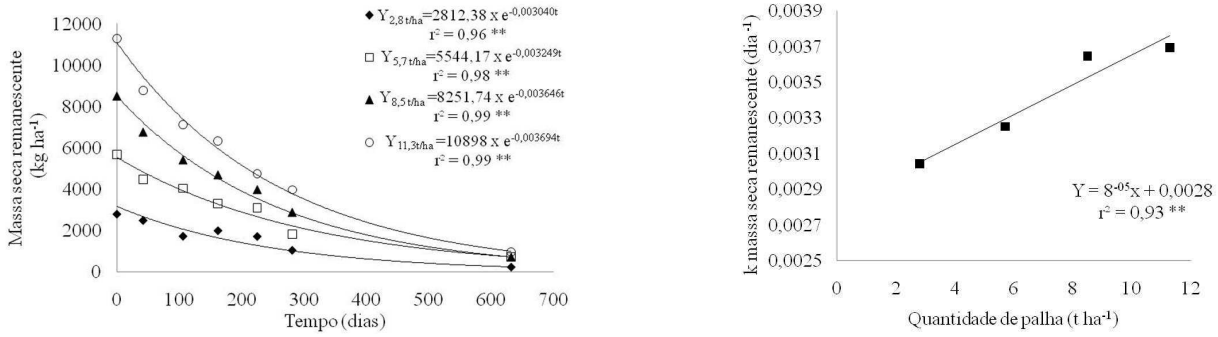
Para auxiliar na discussão dos resultados foram feitos cálculos de balanço de massa para C no solo, bem como análises de correlação estatística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Decomposição da palha de cana-de-açúcar no campo em função de quantidades iniciais depositadas sobre o solo

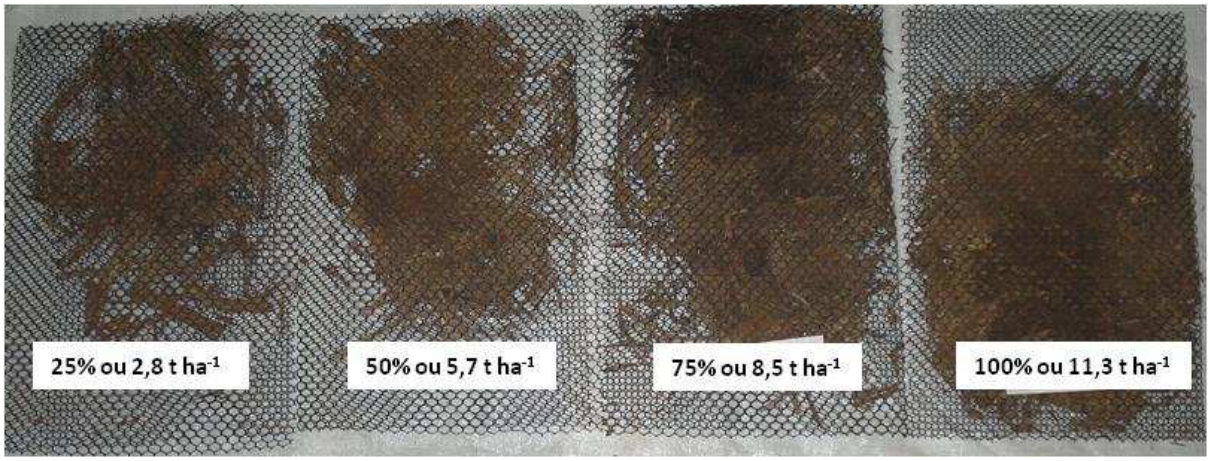
4.1.1 Decomposição da palha e mineralização do carbono

A decomposição da palha de cana-de-açúcar após deposição sobre o solo foi ajustada em função do tempo a modelo de cinética química de primeira ordem, em que se pode observar perdas de massa mais intensas nos primeiros dias de avaliação e para as maiores quantidades de palha depositadas inicialmente (Figura 5A). Aos 281 dias, ou seja, ao final do primeiro ciclo de avaliação, diferenças de massa remanescente sobre solo ainda existiam em função do aporte inicial de palha, o que deixou de ocorrer após o segundo ciclo de avaliação (632 dias). Ao final do primeiro ciclo as quantidades remanescentes de palha foram iguais a 1,0; 1,84; 2,87 e 3,98 t ha^{-1}. No final do segundo ciclo, as quantidades remanescentes de palha ficaram entre 0,2 a 0,9 t ha^{-1}. O aspecto visual da palha de cana após o primeiro e segundo ciclos de avaliação é mostrado na Figura 6.

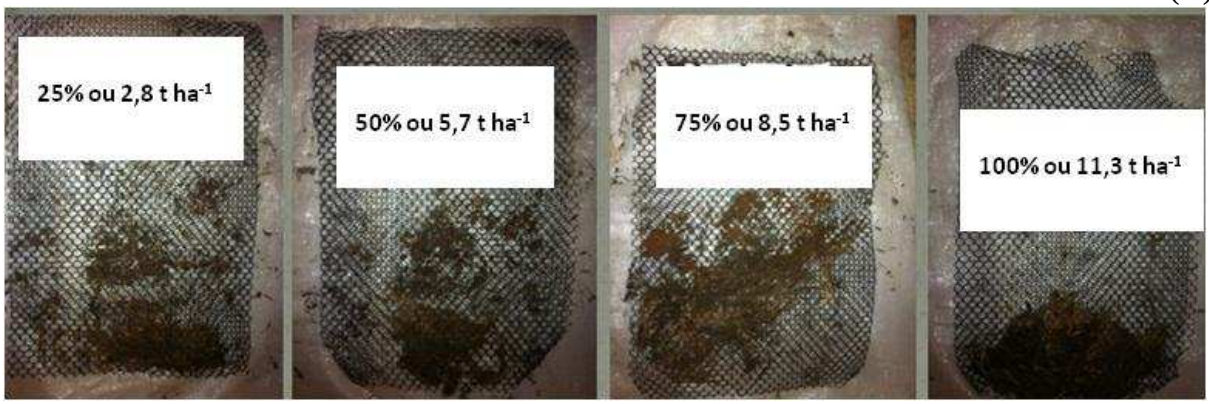


(A) (B)

Figura 5: Massa seca de palha de cana-de-açúcar remanescente sobre o solo após dois ciclos de crescimento da cultura (A); e constante de velocidade do processo de decomposição em função da quantidade de palha depositada inicialmente sobre o solo (B).



(A)



(B)

Figura 6. Aspecto visual dos sacos de decomposição contendo palha de cana-de-açúcar remanescente após 281 dias (A) e 632 dias (B) da deposição sobre o solo. Quantidades de palha inicialmente depositadas sobre o solo referem-se a porcentagens em relação a 11,3 t ha^{-1} (100%).

A redução da massa seca de palha foi diretamente proporcional à quantidade desse resíduo mantida sobre o solo, ou seja, houve incremento na decomposição em função do aumento da quantidade de palha depositada inicialmente. Isso é evidenciado por meio dos resultados de velocidade de decomposição em função do aporte inicial de palha, em que foram observados incrementos na velocidade de decomposição com o aumento da quantidade de palha.

Isso não é muito evidente quando observados exclusivamente os valores de massa seca remanescente após 632 dias, porém os resultados de velocidade de decomposição em função do aporte inicial de palha evidenciam maiores velocidades para as maiores quantidades de palha (Figura 5B).

A relação entre o aporte de palha e a velocidade de decomposição é controversa e informações para a cultura da cana-de-açúcar são escassas. No estudo de BENEDETTI (2014) com quantidades de palha iguais a 10, 20 e 30 t ha^{-1} em base úmida (9, 18 e 28 t ha^{-1} em base

seca, respectivamente) e um ciclo de cultivo da cana, a velocidade de decomposição encontrada para 10 t ha^{-1} foi de 0, 011 $dias^{-1}$, enquanto para as duas outras quantidades de palha o valor foi de 0, 008 $dias^{-1}$.

Os valores absolutos obtidos por esse autor são cerca de duas a quatro vezes superiores aos valores mostrados na Figura 5B, mas isso se deve ao fato da presente pesquisa reunir dados de decomposição de uma mesma palha em dois ciclos consecutivos de desenvolvimento da cana, cujo segundo período foi marcado por menor taxa de decomposição, como será discutido adiante.

DIETRICH (2014) não encontrou relação entre a constante de velocidade de decomposição (k) e a quantidade de palha na superfície do solo. Esse experimento foi conduzido em 5 locais do estado do Rio Grande do Sul, com média de decomposição da massa seca de palha ao final de 12 meses foi igual a 34% (4, 8 e 12 t ha^{-1}). Nesse trabalho, a decomposição da massa seca foi dividida em compartimento lábil e recalcitrante, em que a constante de velocidade de decomposição do compartimento lábil foi em média de 0, 0044 $dias^{-1}$ para 4, 8 e 12 t ha^{-1} de palha.

A hipótese inicial de que menores quantidades de palha resultariam em maior velocidade de decomposição e, conseqüentemente, menor massa seca remanescente sobre o solo não foi confirmada. Os resultados evidenciam comportamento contrário ao esperado, o que pode estar relacionado a condições outras estabelecidas em função da palha, além do aporte de substrato para decomposição. Dentre as alterações provavelmente provocadas pela palha, destacam-se a manutenção da umidade, a redução da amplitude térmica no solo e o aporte do carbono solúvel, variáveis estas relacionadas com a atividade microbiana e favorecimento de fungos (GLÓRIA et al., 2000; FREITAS et al., 2004).

Outros trabalhos da literatura, em que quantidades de palha de cana-de-açúcar variando entre 4 e 20 t ha^{-1} em base seca foram inicialmente aportados ao solo e posteriormente monitorados quanto ao processo de decomposição, também evidenciam decomposição proporcional a quantidade de palha depositada (AQUINO & MEDINA, 2012; DIETRICH, 2014).

A compreensão do processo de decomposição também pode ser feita em termos de porcentagem ou da taxa de decomposição. Nesse caso, após o primeiro ciclo de avaliação a taxa de decomposição baseada na perda de massa variou entre 63% e 68%, com valor médio de 66%; e no segundo ciclo essa variação foi 87% a 92%, com valor médio de 91%. Percebe-se que os valores das taxas são bastante semelhantes entre os tratamentos, contrastando com o efeito na velocidade de decomposição (Figura 5B). Isso significa que o aumento na

velocidade de decomposição é proporcional à quantidade de palha inicialmente depositada (Figura 5B) o que resulta em taxa de decomposição semelhante entre os tratamentos.

FORTES et al. (2012) estudando decomposição da palha de cana-de-açúcar, variedade RB 85-5536, depositada sobre o solo em quantidade equivalente a 10 t ha^{-1} inicial, também verificaram redução de 45% da massa seca em um ciclo e após dois ciclos a redução alcançou 73%.

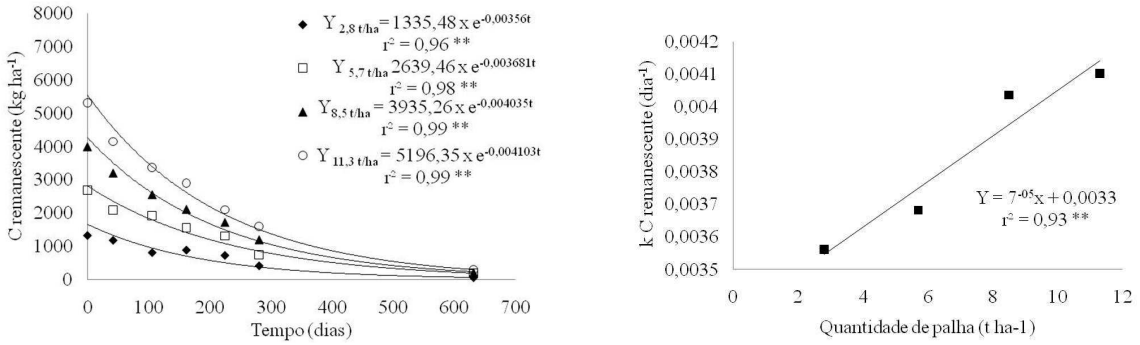
Enquanto trabalhos com outras culturas, como milho, braquiária e labe-labe, cuja relação C/N da biomasa inicial varia de 23/1 a 60/1, evidenciam taxas de decomposição entre 42% e 55% para tempos de avaliação de até 135 dias (WISNIEWSKI & HOLTZ, 1997; CALONEGO et al., 2012; TRINSOUTROT et al., 2000), no presente trabalho com cana-de-açúcar esse valor foi de apenas 37% considerando-se o mesmo tempo anteriormente citado.

Os valores de meia vida de decomposição, que traduzem as velocidades de decomposição, ficaram abaixo do período de duração do primeiro ciclo, sendo iguais a 228, 214, 190 e 188 dias, respectivamente para as quantidades 2,8; 5,7; 8,5 e 11,3 t ha^{-1} de palha.

AQUINO & MEDINA (2012) verificaram que após o primeiro ciclo da cana com duração de 350 dias, a diferença entre a decomposição na maior dose de palha testada (20 t ha^{-1}) e na menor dose (5 t ha^{-1}) foi de cerca de 30%, sendo as taxas iguais a 80% e 53%, respectivamente. Diferentes respostas do processo de decomposição em função da quantidade de palha depositada sobre o solo devem considerar as interações com variáveis climáticas durante o período de avaliação. No caso do trabalho de AQUINO & MEDINA (2012), a precipitação após a deposição da palha sobre o solo foi aparentemente inferior ao verificado no presente estudo, cujo acumulado em quatro meses após a instalação dos sacos alcançou 600 mm. Considerando que a perda de massa é mais intensa no período inicial após o aporte de palha ao solo e que as quantidades de palha parecem ser mais determinantes do processo de decomposição quando a água é fator restritivo, as diferenças mencionadas entre os dois trabalhos são plausíveis.

Valores entre 45% e 70% de decomposição da palha para um ciclo produtivo são citados na literatura (ABRAMO FILHO, 1995; OLIVEIRA et al., 1999; VITTI et al., 2008; FORTES, 2010; DIETRICH, 2014) e são relativamente próximos a média de 66% no primeiro ano de avaliação do presente trabalho. Variações são esperadas em função do ano agrícola e distribuição de chuvas, da variedade de cana, da dose aportada sobre o solo, época de corte da cana e início do período chuvoso, etc. A decomposição da palha no segundo ciclo foi de apenas 25%, ou seja, o processo não ocorreu com a mesma intensidade do primeiro ciclo.

De forma semelhante ao encontrado para massa seca, os resultados de carbono foram satisfatoriamente ajustados ao modelo de cinética química em função do tempo, nas quatro quantidades de palha testadas (Figura 7A).



(A) (B)

Figura 7. Carbono remanescente na palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca) (A); e constante de velocidade de mineralização do carbono em função da quantidade de palha depositada inicialmente sobre o solo (B).

Analisando o teor de carbono na massa seca vegetal durante o período de avaliação verificou-se que os teores variaram pouco (Figura 8), ou seja, que a mineralização do C acompanhou a perda de massa, o que também resultou em taxas de decaimento semelhantes (DIETRICH, 2014).

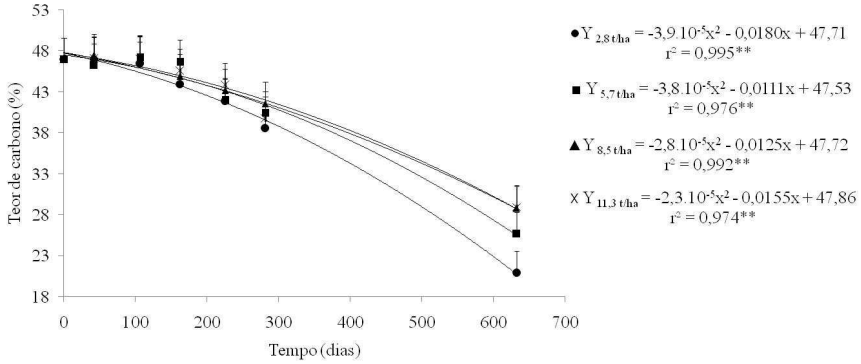


Figura 8. Teor de carbono na palha de cana-de-açúcar em função do tempo de decomposição. Barras verticais representam a diferença mínima significativa entre os teores médios dos carboidratos estruturais dentro de cada tempo de avaliação.

Os valores da constante de velocidade de mineralização do C foram diretamente correlacionados às quantidades de palha aportadas (Figura 7B) e, inclusive, os valores de k foram próximos aos verificados para massa seca (Figura 5B). A partir do coeficiente angular

da equação da Figura 7B, verificou-se que para cada tonelada de carbono aplicada via palha houve incremento na velocidade de decomposição de 7.10^{-5} dia^{-1}, o que transformado para redução da meia vida de mineralização resulta em 4 dias.

A taxa média de mineralização do carbono foi de 70% ao final dos primeiros 281 dias de avaliação, correspondentes ao primeiro ciclo de rebrota avaliado. No segundo ciclo a taxa de mineralização subiu para 95%, ou seja, um acréscimo de 25% em relação ao ciclo anterior. Esse comportamento é consistente com a maior intensidade do processo de perda de massa ou mineralização do C nos primeiros meses após o aporte da biomassa ao solo.

Taxas de mineralização do carbono em torno de 60% após um ciclo de cultivo são reportados em estudos com quantidades de palha variáveis de 4 a 16 t ha^{-1} (FARONI et al., 2003; DIETRICH, 2014).

A relação C/N diminuiu significativamente após um ciclo, em que as menores quantidades de palha (2,8 e 5,7 t ha^{-1}) alcançaram valor médio de C/N de 46/1, enquanto a C/N média das duas maiores quantidades de palha foi de 34/1. O efeito da quantidade de palha na perda de massa durante o processo de decomposição e na mineralização do carbono conduziu a menor valor de C/N com o incremento do aporte de palha. Isso significa que o material remanescente nos tratamentos com maior aporte inicial de palha encontra-se em estágio de decomposição mais avançado.

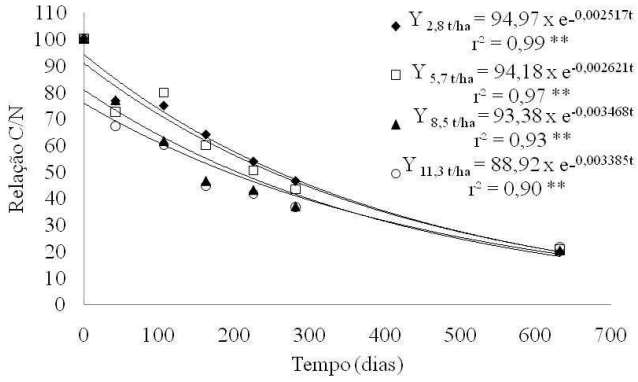


Figura 9. Relação C/N da palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca).

Outro aspecto importante diz respeito ao valor teórico aproximado de 30/1 para que o material vegetal em decomposição passe a exibir mineralização líquida de N (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006; TASCA, 2009), ou seja, passe a ser fonte de N no ambiente. Nesse sentido, somente após um ciclo de avaliação a palha da cana-de-açúcar alcançou valores próximos a 30/1, o que significa que provavelmente não houve liberação líquida de N a partir

da palha e o processo de imobilização deve ter sido predominante neste período. No segundo ciclo, no entanto, há deposição de nova palha sobre a antiga, o que pode resultar em imobilização de N pela palha nova e, talvez, sem saldo em favor da mineralização deste nutriente, mas isso deve ser melhor investigado em outros trabalhos.

Após dois ciclos, a relação C/N atingiu valor de 20/1, independentemente da quantidade de palha aportada. Resultados apresentados em FORTES et al. (2012) mostram que a relação C/N da palha de cana-de-açúcar, inicialmente de 70/1 e 108/1, foi reduzida a 53/1 e 55/1, respectivamente, após um ciclo de avaliação; e para 35/1 e 24/1 após o segundo ciclo. Para a cana com relação C/N inicial da palha de 70/1 houve redução para 22/1 no terceiro ciclo de avaliação.

4.1.2 Carboidratos estruturais da palha de cana-de-açúcar

Os carboidratos estruturais (hemicelulose e celulose) e lignina corresponderam a 85% da massa de palha inicial, sendo 36% de hemicelulose, 39% de celulose e 10% de lignina.

A decomposição dos três carboidratos estruturais seguiu o modelo de cinética química de primeira ordem (Figura 10), tal como o verificado para a perda de massa e mineralização do carbono. No entanto, valores de k superiores e inferiores aos verificados para massa seca são observados (Figura 10), o que é plausível ao considerar que 85% da massa de palha inicial é função do somatório de hemicelulose, celulose e lignina, e a velocidade de decomposição da palha deve refletir, pelo menos em parte, as velocidades ponderadas de decomposição dos carboidratos estruturais.

Por meio dos valores de k para os três carboidratos estruturais (Figura 10), verificou-se que as velocidades de decomposição decresceram na seguinte ordem: hemicelulose > celulose > lignina. Esse comportamento é conhecido principalmente para hemicelulose e celulose em comparação com a lignina (MELILLO et al., 1982; SANGER et al., 1998). De acordo com GALVÃO et al. (1991), o teor de lignina e o teor de nitrogênio inicial do material têm fundamental importância na velocidade de decomposição de resíduos vegetais, sendo que quanto maior o teor de lignina, menor o teor N e mais lenta é a decomposição.

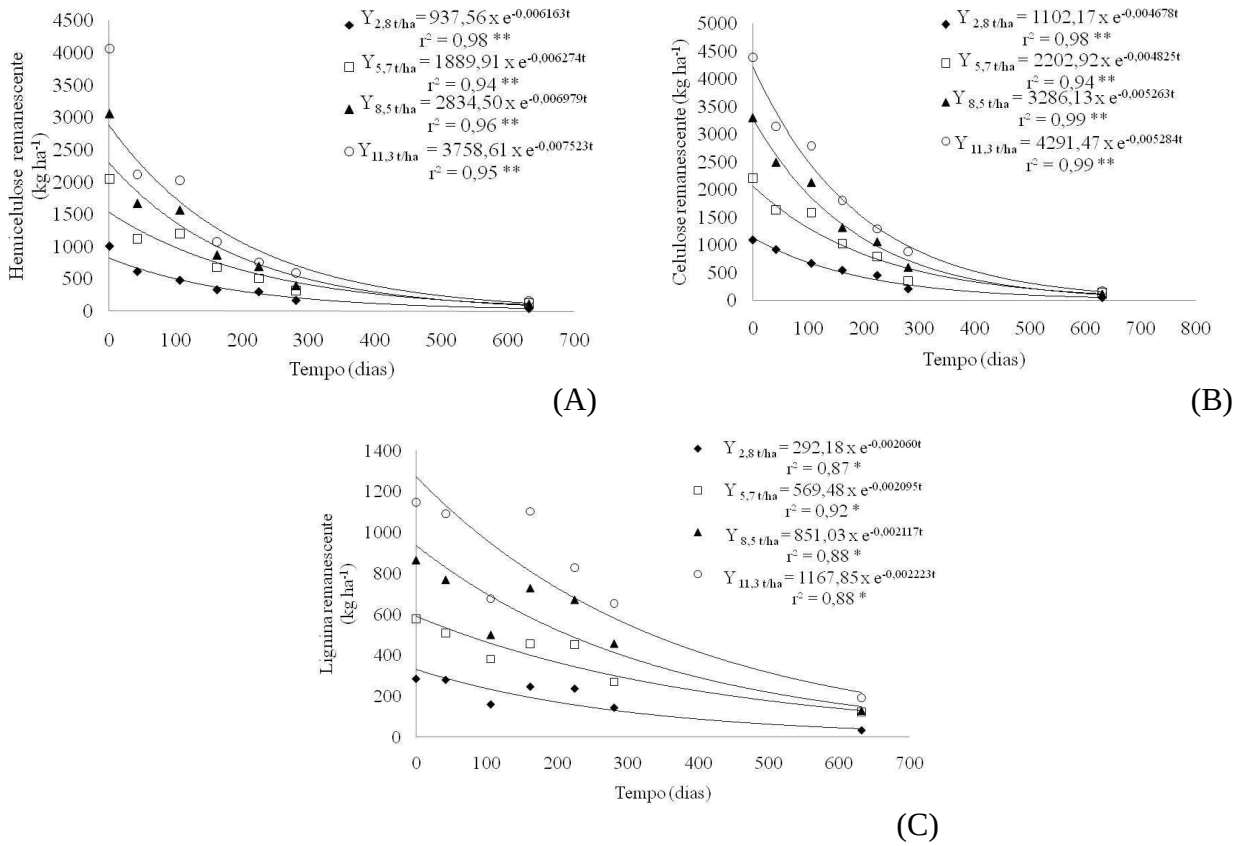


Figura 10. Quantidades de hemicelulose (A), celulose (B) e lignina (C) remanescentes na palha de cana-de-açúcar em função do tempo e da quantidade de palha inicialmente aportada sobre o solo (2,8; 5,7; 8,5; e 11,3 t ha^{-1}, em base seca).

De modo geral, a decomposição de resíduos orgânicos no solo apresenta três fases mais ou menos distintas (CAMARGO et al., 1999): (i) fase inicial – biodegradação rápida de compostos orgânicos prontamente disponíveis (açúcares, proteínas e celulose, entre outros) pelos microrganismos; (ii) segunda fase - produtos orgânicos intermediários (protoplasma microbiano) são biodegradados; e (iii) fase final - decomposição de compostos de carbono mais recalcitrantes, como a lignina, realizada pelos actinomicetos e fungos.

Desse modo, ao final do primeiro ciclo, aos 281 dias, a hemicelulose, celulose e lignina apresentaram decomposição média de 85%, 76% e 45%, respectivamente. No segundo ciclo, a decomposição de hemicelulose e celulose foi praticamente total, alcançando 98% para hemicelulose e 96% para celulose, enquanto para a lignina foi de 74%. Comparando-se os valores de decomposição do primeiro com os do segundo ciclo, tem-se que a decomposição da hemicelulose no segundo ciclo foi de apenas 14%, de celulose 20% e de lignina 29%. Isso significa que no primeiro ciclo a decomposição de celulose e hemicelulose responderam pela maior parte da perda de massa da palha, sendo que no segundo ciclo foi a lignina quem representou o compartimento responsável pela maior perda de massa.

OLIVEIRA et al. (2002) verificaram decomposição de 81% da hemicelulose, 57% da celulose e 22% da lignina da palha de cana após 11 meses da permanência no campo, o que está de acordo para o valor de hemicelulose, porém um pouco abaixo dos valores de celulose e lignina obtidos ao final do primeiro ciclo de avaliação (281 dias) neste trabalho.

Conforme comentado anteriormente, a lignina é relativamente mais recalcitrante à decomposição, uma vez que é molécula fenólica altamente complexa (TAIZ & ZEIGER, 2009). Tal fato pode conduzir a certo enriquecimento em lignina do material vegetal remanescente (Figura 10C) com o tempo, uma vez que a perda de massa está mais associada a períodos iniciais da decomposição, a outros compostos orgânicos biodegradáveis, tais como hemicelulose e celulose (Figura 10A e 10B).

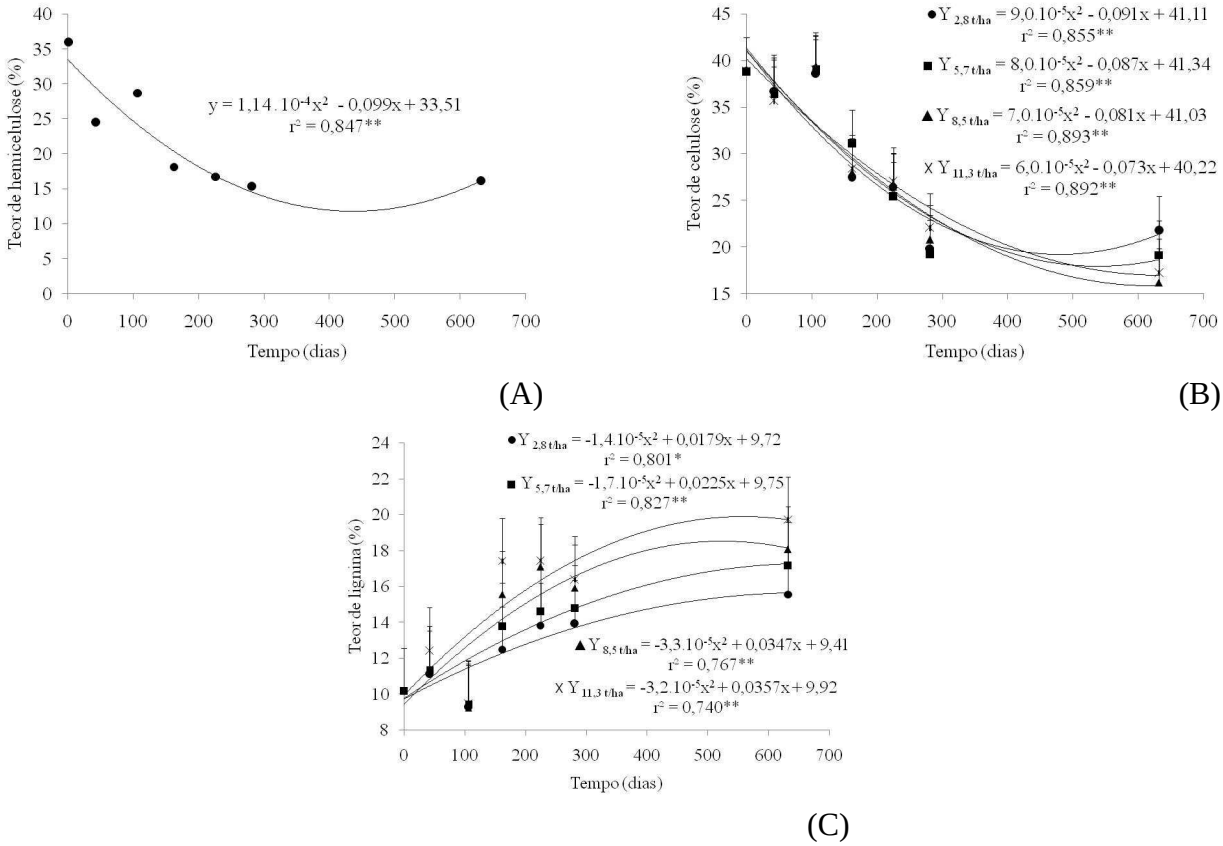


Figura 11. Teores de hemicelulose (A), celulose (B) e lignina (C) na palha de cana-de-açúcar em função do tempo de decomposição. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5%, entre os teores médios dos carboidratos estruturais dentro de cada tempo de avaliação.

As concentrações de hemicelulose no material vegetal reduziram com o tempo, independentemente da quantidade de palha aportada inicialmente (Figura 11A). Para celulose e lignina houve interação entre a quantidade de palha e o tempo (Figura 11B e 11C). A

ausência de interação entre os fatores estudados para os teores de hemicelulose está relacionada com a rápida decomposição deste composto (Figura 9), sendo menos influenciado pelas possíveis condições favoráveis à atividade microbiana em função do aporte de palha. Ressalta-se, ainda, que as principais alterações no teor de hemicelulose ocorreram até o 162º dia após deposição da palha sobre o solo (Figura 11A), período este mais intenso em termos de perda de massa seca (Figura 5A) e de carbono (Figura 7A).

Os teores de celulose na palha diminuíram com o tempo até o final do primeiro ciclo de desenvolvimento da cana; e ao final do segundo ciclo (632 dias) exibiram certa tendência de estabilização ou concentração na massa seca final (Figura 11B). O teor de celulose aos 632 dias na palha remanescente do tratamento com 2,8 t ha^{-1} foi 30% superior aos teores de celulose nos tratamentos com as duas maiores quantidades de palha (Figura 11B), o que corrobora com a maior velocidade de decomposição em função do incremento na quantidade de palha mantida sobre o solo (Figura 5B).

Como a lignina é dentre os três compostos avaliados o mais recalcitrante no ambiente, foi possível observar mais claramente o efeito da palha na manutenção das condições favoráveis (umidade e temperatura, provavelmente) à atividade microbiana. A lignina passou a exibir diferenças nos teores a partir do 162º dia de avaliação (Figura 11C), período este em que a maior parte da hemicelulose já havia sido decomposta (meia-vida da hemicelulose entre 92 e 112 dias – valores calculados usando os valores de k da Figura 9A).

4.1.3 Considerações Finais

A decomposição de restos de cultura no solo agrícola envolve mudanças quantitativas e qualitativas no material, com redução da massa remanescente sobre o solo, concomitantemente a alteração da qualidade do material orgânico. Com base nas informações obtidas nesse estudo, o esquema da Figura 12 é sugerido para simplificação da dinâmica de decomposição da palha de cana-de-açúcar, de modo a melhorar a compreensão do processo.

A decomposição da palha de cana-de-açúcar, em termos de massa seca, foi diretamente proporcional à quantidade de palha mantida na superfície do solo após a colheita. Desse modo, as taxas de decomposição foram semelhantes entre os tratamentos (quantidade palha depositadas após colheita).

No primeiro ciclo houve redução de 66% da massa seca, enquanto no segundo ciclo o valor foi de 25%. Essa diferença na decomposição entre o primeiro e o segundo ciclo reflete

alterações qualitativas do material, em que compostos mais recalcitrantes se concentram no material remanescente e cuja decomposição é realizada por microrganismos mais específicos.

Pode-se observar a diminuição da concentração dos teores de hemicelulose e celulose com o aumento da taxa de mineralização do C, ou seja, a decomposição destes carboidratos estruturais responde pela maior perda de massa da palha. A lignina por ser um composto mais recalcitrante, ou seja, com maior resistência a decomposição, tende a aumentar a sua concentração com o aumento da taxa de mineralização do carbono.

A relação C/N inicial da palha de cana-de-açúcar é consideravelmente alta, cerca de 100/1, e com o avanço do processo de mineralização do carbono, a relação C/N é reduzida, chegando a 34/1 para as maiores quantidades de palha (8,5 e 11,3 t ha^{-1}) e a 46/1 para as menores quantidades de palha (2,8 e 5,7 t ha^{-1}) ao final do primeiro ciclo. Ao final do segundo ciclo, entretanto, independentemente da quantidade de palha, a relação C/N tende a se igualar chegando a aproximadamente 20/1.

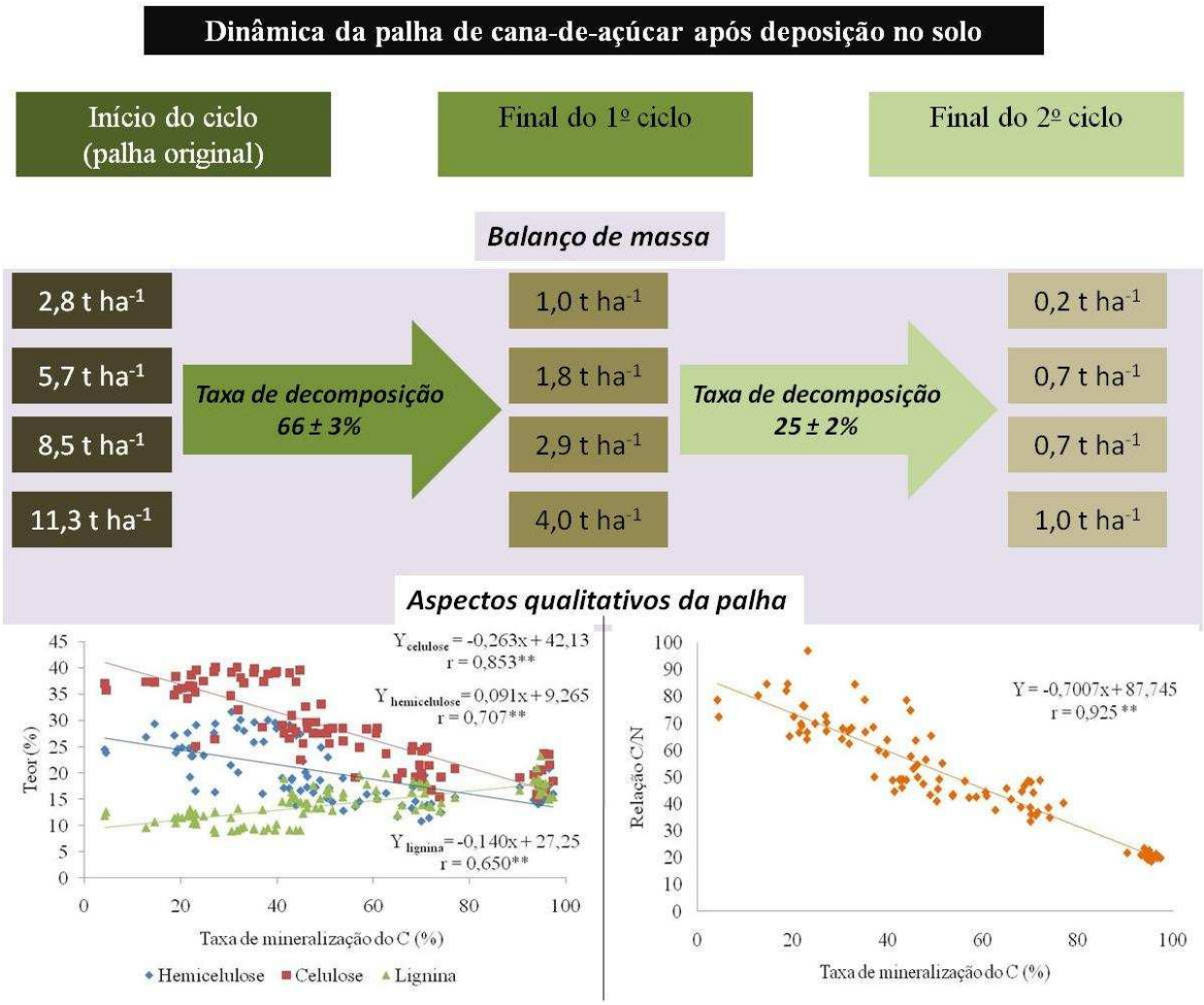


Figura 12. Esquema simplificado de decomposição, balanço de massa e aspectos qualitativos a partir de diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar deixadas sobre o solo após a colheita, aos 281 (1º ciclo) e 632 (2º ciclo) dias.

De forma a complementar a Figura 12 apresenta-se a Tabela 1, para melhor visualização da taxa de decomposição mencionada anteriormente na discussão dos resultados apresentados. Portanto, a fim de se compreender o processo ao final do primeiro e do segundo ciclo do experimento segue abaixo a Tabela 1.

Tabela 1. Taxa de mineralização do carbono e dos carboidratos estruturais (celulose, hemicelulose) e lignina ao final do primeiro e do segundo ano de experimento.

Quantidade de palha	Carbono		Celulose		Hemicelulose		Lignina	
	1º ano	2º ano	1º ano	2º ano	1º ano	2º ano	1º ano	2º ano
t ha^{-1}	---------- (%) ----------							
2,8	69,46	96,50	81,07	95,50	83,68	96,23	49,37	87,89
5,7	72,29	93,07	84,13	93,80	84,85	94,43	53,44	78,86
8,5	70,04	94,90	81,88	96,54	87,02	96,43	47,22	85,25
11,3	70,24	94,78	79,97	96,24	85,61	96,32	43,20	83,45

4.2 Decomposição da palha de cana-de-açúcar com ou sem aplicação de vinhaça

Os fluxos de C-CO_2 durante o período de incubação variaram em função do tempo e da associação com a aplicação ou não de vinhaça (Figura 13).

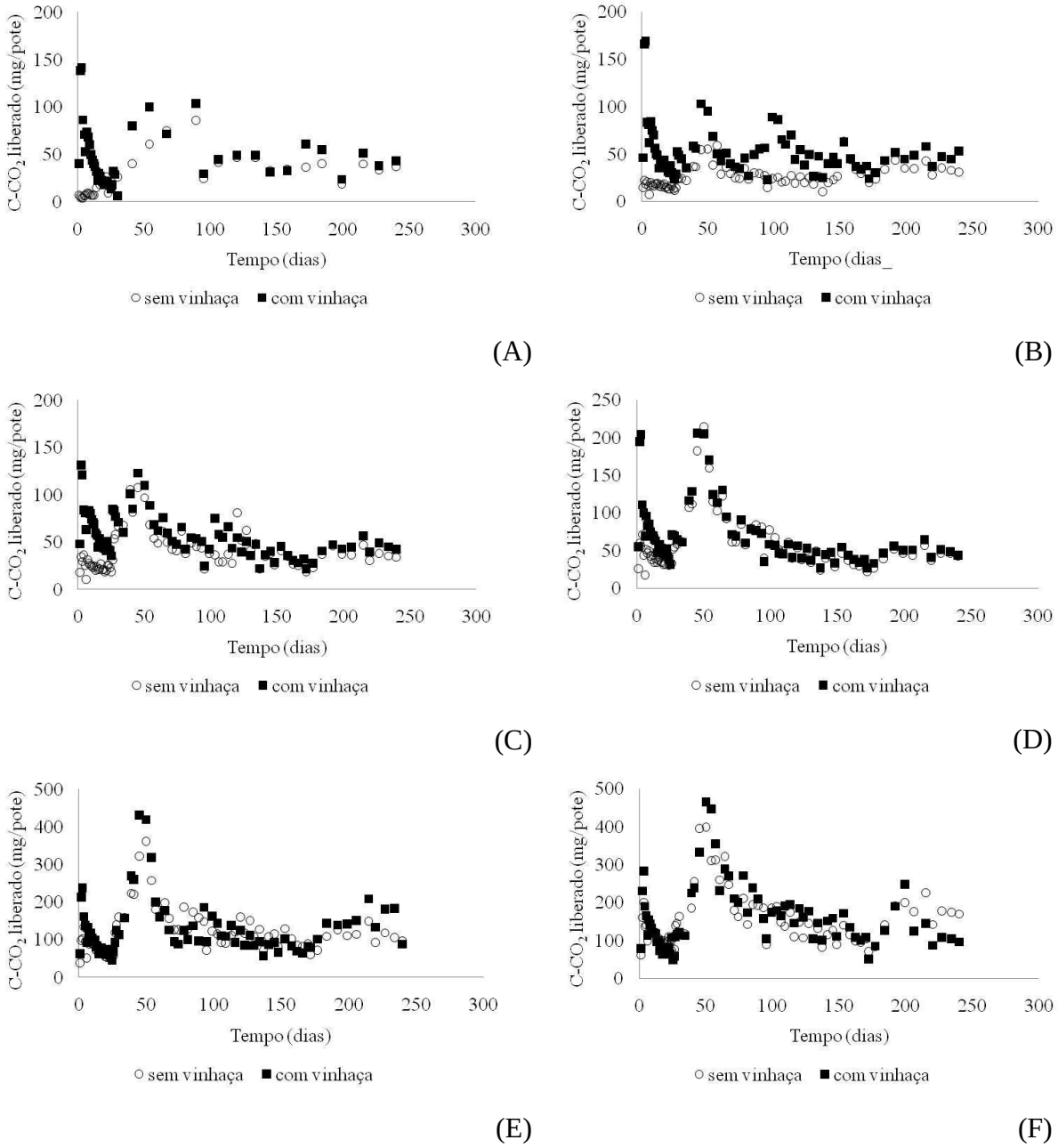


Figura 13. Carbono liberado na forma CO_2 (C-CO_2) em função do tempo de incubação e com ou sem aplicação de vinhaça. (A) 0 t ha^{-1} de palha, (B) 20 mg cm^{-2} (2t ha^{-1} de palha), (C) 40 mg cm^{-2} (4 t ha^{-1} de palha), (D) 80 mg cm^{-2} (8 t ha^{-1} de palha), (E) 160 mg cm^{-2} (16 t ha^{-1} de palha) e, (F) 240 mg cm^{-2} (24 t ha^{-1} de palha).

Um pico de emissão no terceiro dia de incubação foi verificado para todos os tratamentos com vinhaça, o que foi atribuído ao metabolismo microbiano do carbono solúvel

do referido resíduo. Esse efeito durou cerca de 20 a 25 dias nos tratamentos sem palha e nos tratamentos com as três menores quantidades de palha (20, 40 e 80 mg cm^{-2}). Nos tratamentos com maior aporte de resíduo vegetal o tempo de duração do pico foi inferior a 20 dias. De modo geral, o fluxo de C-CO_2 associado ao uso da vinhaça variou de 120 a 285 mg cm^{-2}.

De fato o carbono da vinhaça está principalmente presente em compostos derivados da lise de células de leveduras e do mosto parcialmente fermentado, sendo considerados de fácil decomposição e fonte lábil de energia aos microrganismos (GLÓRIA, 1980). No trabalho de MINHONI & CERRI (1987) a decomposição da vinhaça no solo também proporcionou maior liberação de CO_2 nos primeiros dias de incubação, concordando com o aqui descrito para o primeiro pico de fluxo de C-CO_2 verificado durante o período experimental.

O segundo pico de liberação de C-CO_2 ocorreu para todas as quantidades de palha e foi independente da aplicação ou não de vinhaça, tendo iniciado após os primeiros 25 dias de incubação (Figura 13B, C, D, E, F). Dessa forma, o período aproximado de 25 dias foi o tempo necessário para a adaptação da comunidade microbiana ao substrato de carbono caracterizado pela palha, uma vez que nos tratamentos com vinhaça praticamente todo o C do referido resíduo já havia sido mineralizado.

A máxima liberação de C-CO_2 associada a decomposição da palha ocorreu próximo ao 50^{o} dia de incubação (Figura 13) e a magnitude desse pico foi variável em função da quantidade de palha localizada inicialmente sobre o solo. Os maiores fluxos de C-CO_2 foram verificados nos tratamentos com mais palha.

Ao se acumular os resultados de C-CO_2 liberado em função do tempo, verificaram-se interação tripla significativa entre os fatores testados (quantidade de palha x vinhaça x tempo).

O C-CO_2 acumulado aumentou com a quantidade de palha de cana aplicada, obedecendo a modelo linear (Figura 14). Nas quantidades de palha até 80 mg cm^{-2} não foram verificadas diferenças no C-CO_2 acumulado em função da aplicação ou não de vinhaça, enquanto nas maiores doses de palha (160 e 240 mg cm^{-2}) e uso de vinhaça o valor foi inferior ao tratamento sem vinhaça.

Isolando-se por meio de cálculos o C-CO_2 emitido em função da vinhaça aplicada, tem-se que, em média, foram emitidos 1.208 mg $pote^{-1}$ de C-CO_2, valor este bastante próximo dos 1.560 mg $pote^{-1}$ de C aplicados via vinhaça. Dessa forma, a recuperação média do C aplicado como vinhaça foi de 77%, o que é bastante elevado ao se considerar as variações em torno dos valores médios, inclusive do valor médio de C determinado na vinhaça utilizada.

O C-CO_2 liberado acumulado ao final de 240 dias de avaliação foi proporcional a quantidade de palha depositada sobre o solo, sendo que para quantidades de palha até 80 mg cm^{-2} não foram verificadas diferenças entre a aplicação ou não de vinhaça (Figura 14). Para as duas maiores quantidades de palha testadas, a aplicação de vinhaça proporcionou menor liberação de C-CO_2, o que aparentemente é contraditório ao se considerar que a vinhaça é fonte lábil de C.

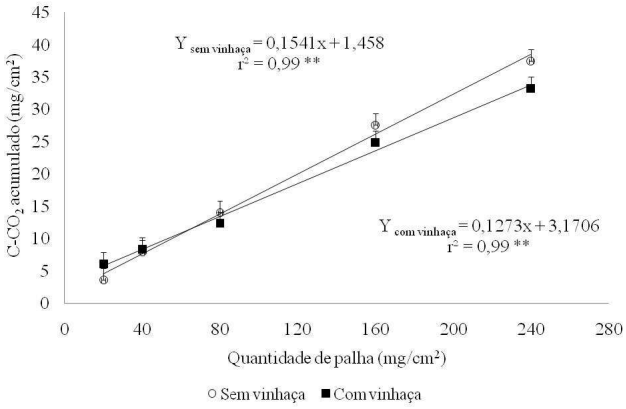


Figura 14. Carbono acumulado na forma de CO_2 (C-CO_2), em função das quantidades de palha de cana-de-açúcar (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) e o efeito com e sem aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa entre C-CO_2 acumulado dentro de cada tempo de avaliação.

Por outro lado deve-se considerar que a vinhaça também é fonte de N no sistema e, dessa forma, pode promover maior estabilização do material orgânico no solo (POTRICH, 2012), uma vez que para biomassas com elevada relação C/N há limitação de N nessa estabilização.

A ausência de diferença no C-CO_2 entre os tratamentos com e sem vinhaça, para as menores quantidades de palha (20,40 e 80 mg cm^{-2}), pode ser explicado pela menor demanda de N para estabilização do material, cujo solo também funciona como fonte de N.

Os valores de C-CO_2 acumulado aumentaram linearmente com o aumento da quantidade de palha, para todos os tempos de avaliação, como já era esperado, uma vez que o acumulado é a somatória de todas as leituras realizadas (Figura 15).

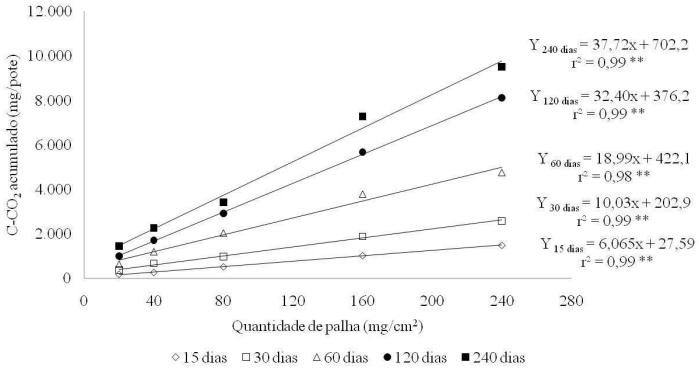


Figura 15. Carbono acumulado na forma de CO_2 ($C\text{-}CO_2$), em função das quantidades de palha de cana-de-açúcar (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) e dentro de cada tempo de avaliação (15, 30, 60, 120 e 240 dias).

De acordo com a cinética de mineralização do carbono representada pelas equações da Figura 16, verifica-se que houve incremento da velocidade do processo de mineralização (representada pelo valor de k da equação) em função do aumento da quantidade de palha até 80 mg cm^{-2}, independentemente da aplicação ou não de vinhaça. Para as duas maiores quantidades de palha o valor de k foi em média 0,01 $dias^{-1}$, pouco inferior ao verificado com 80 mg cm^{-2} de palha.

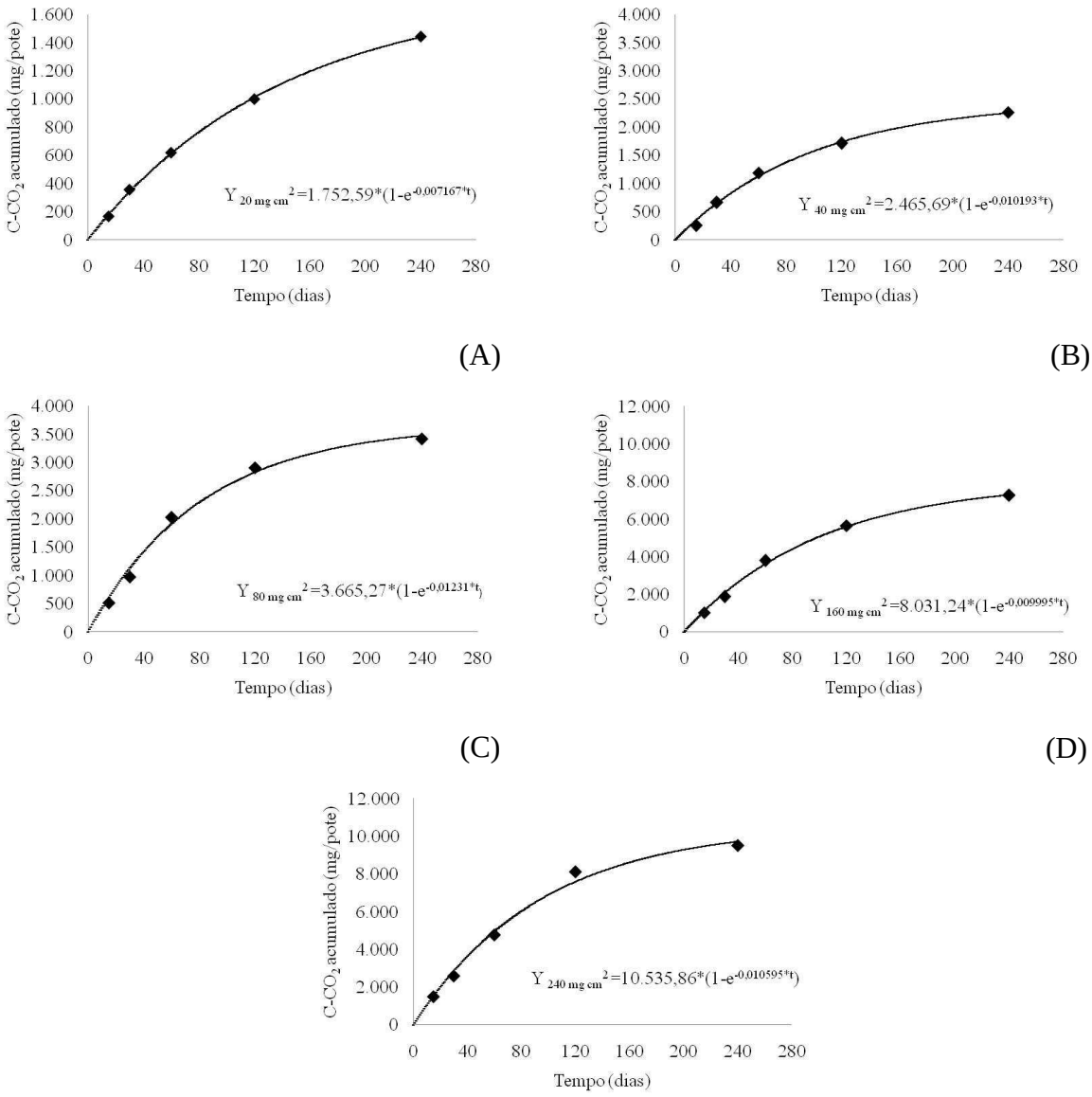


Figura 16. Carbono acumulado na forma de CO_2 ($C\text{-}CO_2$) em função do tempo e das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 a 240 mg cm^{-2}) adicionadas sobre a superfície do solo. (A) 20 mg cm^{-2} de palha (2 t ha^{-1}), (B) 40 mg cm^{-2} de palha (4 t ha^{-1}), (C) 80 mg cm^{-2} de palha (8 t ha^{-1}), (D) 160 mg cm^{-2} de palha (16 t ha^{-1}) e, (E) 240 mg cm^{-2} de palha (24 t ha^{-1}).

A massa seca de palha remanescente sobre o solo foi maior, quanto mais elevado o aporte inicial de palha, sendo que não foi observado efeito da vinhaça para a menores quantidades (20, 40 e 80 mg cm^{-2}) de palha aportadas inicialmente (Figura 17).

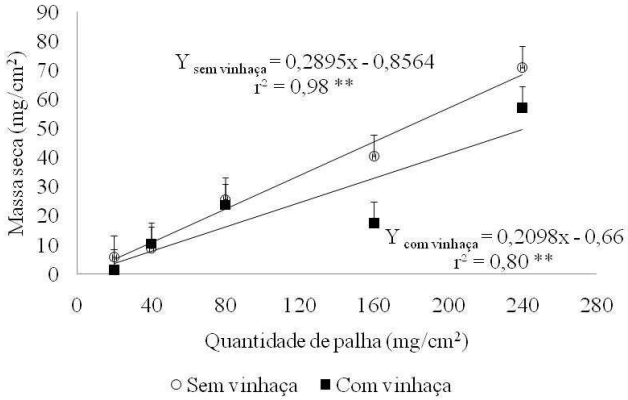


Figura 17. Massa seca remanescente da palha de cana-de-açúcar em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) aportadas inicialmente e da aplicação ou não de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as quantidades médias de massa seca remanescente nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

A aplicação de vinhaça nos tratamentos com 160 e 240 mg cm^{-2} de palha (16 e 24 t ha^{-1}, respectivamente) resultou em massas remanescentes 11 e 24% inferiores às verificadas sem aplicação de vinhaça (Figura 17), ou seja, o inverso do observado para os valores de C-CO_2 acumulado (Figura 14). De fato, maior decomposição da palha com adição de vinhaça era esperada, uma vez que o referido resíduo é fonte de C solúvel, facilmente metabolizado pelos microrganismos do solo (RODELLA et al., 1983), e de N, que muitas vezes limita a atividade microbiana.

A taxa de decomposição da palha de cana-de-açúcar após 240 dias de incubação não variou com a quantidade de palha inicialmente mantida sobre o solo, mas houve efeito da aplicação de vinhaça (Figura 18). Considerando-se os tratamentos com 20, 160 e 240 mg cm^{-2} de palha, as taxas de decomposição foram incrementadas entre 14 e 35% em função do uso da vinhaça.

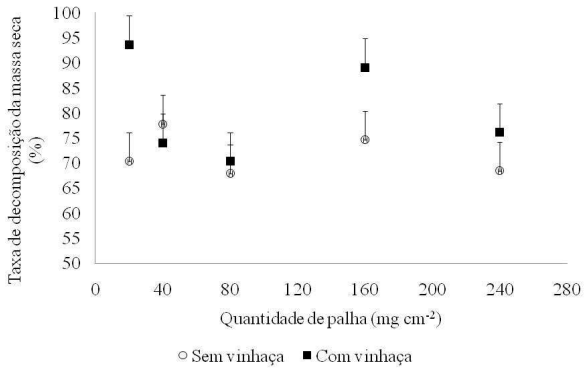


Figura 18. Taxa de decomposição da palha de cana-de-açúcar degradada em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as taxas de decomposição da palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

.

Os resultados de C remanescente são concordantes com os de massa seca, inclusive com relação às diferenças entre os tratamentos com e sem vinhaça, para as duas maiores quantidades de palha estudadas (Figura 19).

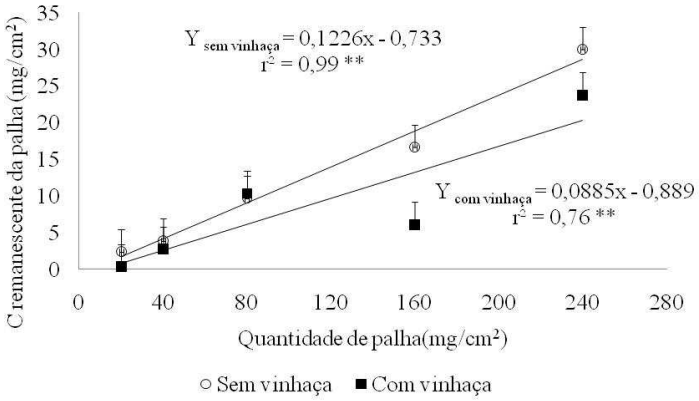


Figura 19. Carbono remanescente da palha de cana-de-açúcar em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça, adicionada ao solo após 240 dias de incubação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5% entre as quantidades médias da massa seca remanescente de palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

O comportamento contrastante entre o uso ou não de vinhaça nos tratamentos com 160 e 240 mg cm^{-2} de palha, quando se mensura o C-CO_2 acumulado (Figura 14) ou a massa seca remanescente (Figura 17), pode ser melhor discutido observando-se o teor de C no solo e fazendo-se o balanço de massa.

O carbono do solo foi incrementado com quantidade de palha aportada inicialmente nos tratamentos, na presença de vinhaça, porém nos tratamentos sem vinhaça esse comportamento não foi observado (Figura 20).

Partindo-se do fato de que a vinhaça incrementou a taxa de decomposição da palha e considerando-se que a palha de cana, com elevada relação C/N inicial, pode apresentar maior estabilização do C em função do aporte de N via vinhaça, realmente se poderia supor ganhos de carbono pelo solo nesta situação. O desafio é determinar com incertezas aceitáveis esses ganhos ou perdas de C pelo solo, principalmente em estudos de curto prazo. Dessa forma, o balanço de massa proposto para diagnosticar perdas ou ganhos de C pelo solo auxilia na descrição do processo de mineralização e nos potenciais impactos sobre o sistema edáfico.

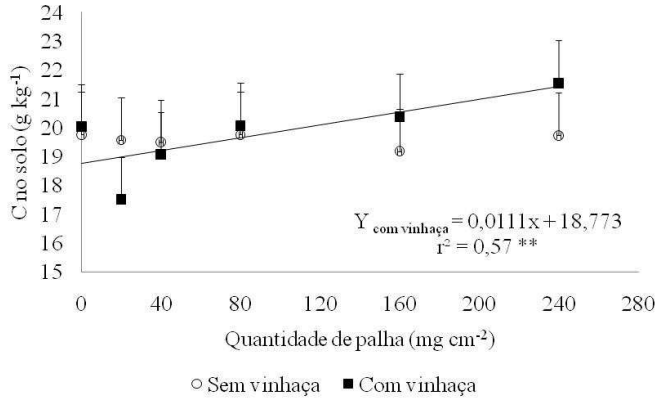


Figura 20. Carbono no solo em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e com e sem aplicação de vinhaça após 240 dias de incubação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre os teores médios do carbono no solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

Balanços negativos de C no solo ocorreram para quantidades relativamente baixas de palha mantidas sobre o solo, independentemente da aplicação ou não de vinhaça (Figura 21), sendo que o balanço neutro ocorreu para 20 mg cm^{-2} (≈ 2 t ha^{-1}) de palha na condição com vinhaça e com 26 mg cm^{-2} (≈ 3 t ha^{-1}) de palha na condição sem aplicação de vinhaça.

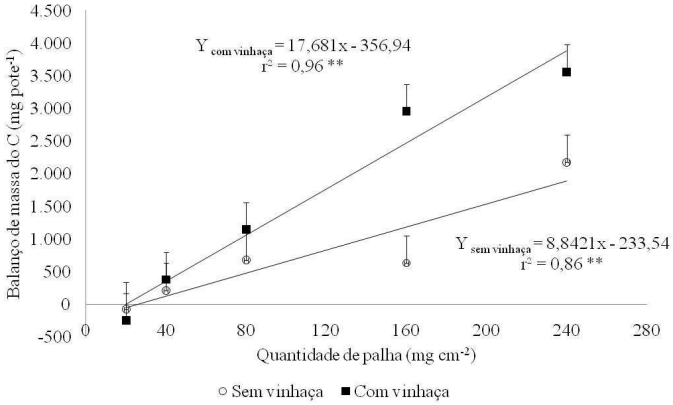
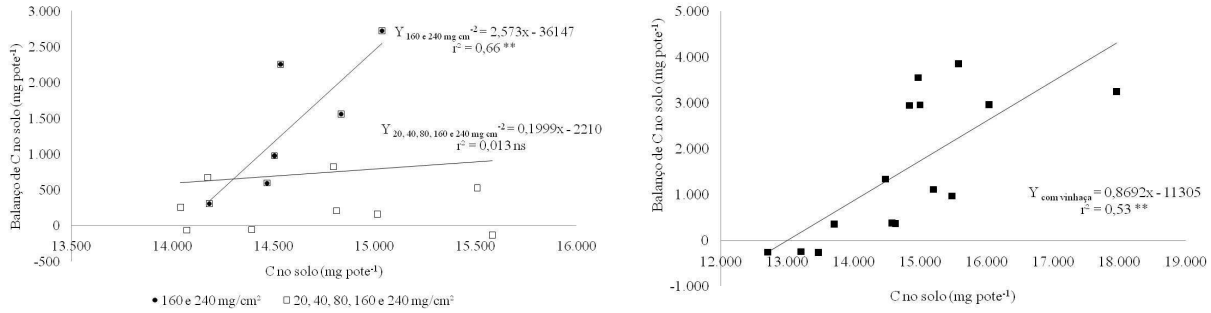


Figura 21. Balanço de massa do carbono no solo em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação de vinhaça, com e sem a aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre os balanços médios de carbono no solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

Os ganhos em C pelo solo considerando-se as quantidades de 160 e 240 mg cm^{-2} de palha com vinhaça foram o dobro da verificada para essas mesmas quantidades de palha, porém sem o uso de vinhaça (Figura 21). A relação entre os valores estimados no balanço de massa e os teores de C quantificados diretamente no solo foi testada por meio de correlações estatísticas (Figura 22).

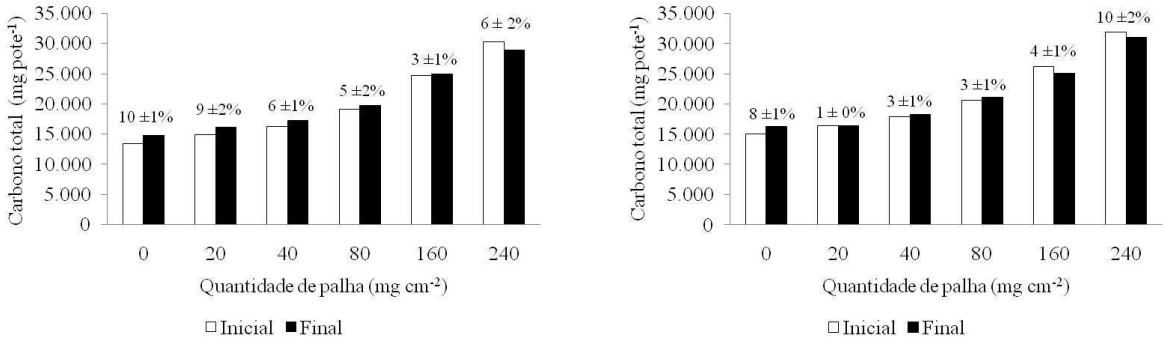


(A) (B)

Figura 22. Correlação entre o teor de carbono do solo e o balanço de massa de carbono estimado em função dos aportes desse elemento via palha e vinhaça, da saída como C-CO_2 e do estoque na massa seca de palha remanescente (Balanço de C = ($C_{palha\ inicial}$ – $C_{palha\ final}$) + $C_{vinhaça}$ – C-CO_2). Sem aplicação de vinhaça (A). Com aplicação de vinhaça (B).

Houve correlação estatística significativa entre os valores de balanço de C e os teores de C no solo, o que de certa forma valida as estimativas feitas, uma vez que os resultados de C no solo não fizeram parte do balanço de massa. Cabe ressaltar que nos tratamentos sem vinhaça a correlação somente foi verificada para os pares de dados gerados nos tratamentos com 160 e 240 mg cm^{-2} de palha (Figura 22A), o que é plausível devido às pequenas entradas de C (inferiores a 500 mg $pote^{-1}$ ou 0,7 g kg^{-1} – estimado pelo balanço de massa, Figura 21).

De forma análoga ao balanço de massa com foco nos ganhos ou perdas de C no solo, realizou-se novo balanço, porém dessa vez englobando o próprio solo (Figura 23), cujo objetivo foi dar maior credibilidade aos números apresentados neste documento.



(A) (B)

Figura 23. Carbono total em função das quantidades de palha de cana-de-açúcar (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}). (A) Somatório do carbono inicial (C palha $_{inicial}$ + C do solo $_{inicial}$) e final (C palha $_{final}$ + C solo $_{final}$ + C-CO_2 acumulado $_{240\ dias}$), sem aplicação de vinhaça. (B) Somatório do carbono inicial (C palha inicial + C vinhaça + C do solo inicial) e final (C palha final + C solo final + C-CO2 acumulado 240 dias), com aplicação de vinhaça. Valores acima das barras verticais representam o erro padrão entre o Inicial e o Final.

Neste novo balanço de C idealmente esperava-se que a quantidade total de C no início da incubação, representada pelo C do solo, C da palha e C da vinhaça (quando adicionada), fosse igual a quantidade de C ao final da incubação, função do C do solo, C da palha e C-CO_2 acumulado. Percebe-se, portanto, que os valores iniciais e finais estimados são próximos, com erros bastante aceitáveis entre 3 e 10% da massa inicial de palha, confirmando a boa qualidade dos resultados apresentados (Figura 23A e B).

Em termos de N remanescente na palha, os valores foram maiores quando não houve aplicação de vinhaça, para praticamente todas as quantidades de palha avaliadas (Figura 24).

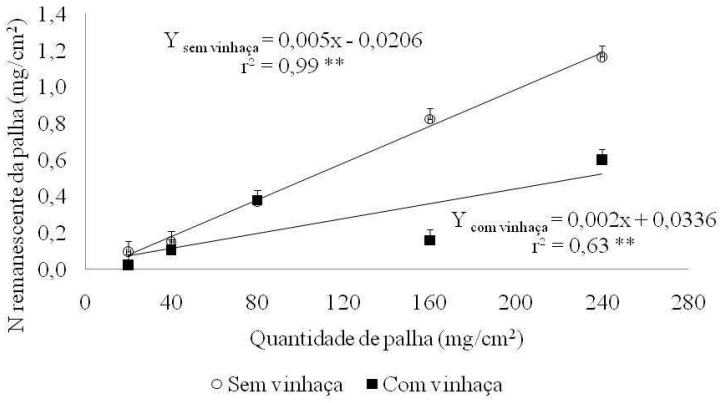


Figura 24. Nitrogênio remanescente na palha de cana-de-açúcar após 240 dias, em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) e da aplicação ou não de vinhaça, adicionada ao solo. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre as quantidades médias de nitrogênio remanescente na palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

Diferenças no N remanescente na palha em função da aplicação ou não de vinhaça foram verificadas somente para as quantidades de palha 160 e 240 mg cm^{-2}, em que os tratamentos sem vinhaça exibiram, em média, o dobro de N remanescente na palha (Figura 24).

Considerando que o teor de N na palha inicial da cana foi igual a 0,55%, tem-se que para 1 kg de palha havia originalmente 5,5 mg de N imobilizadas no material vegetal. Após 240 dias de incubação, 1 kg de palha remanescente sobre o solo estaria imobilizando 13 e 14 mg de N nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça, respectivamente. Isso significa que houve imobilização de N pela palha da cana-de-açúcar durante o período experimental, o que juntamente com a perda de C na forma de CO_2 ajuda a explicar as reduções na relação C/N da palha remanescente (Figura 25).

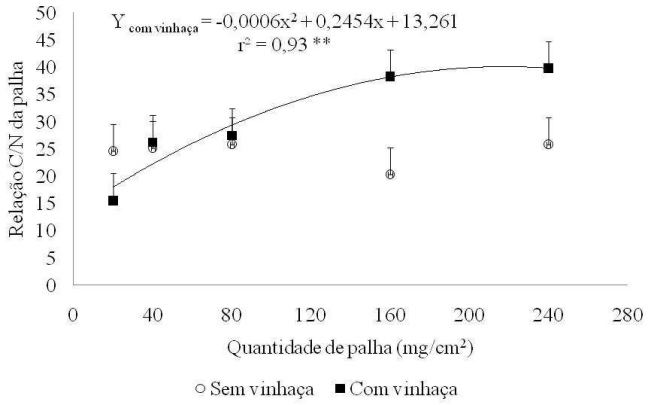


Figura 25. Relação carbono/nitrogênio da palha de cana-de-açúcar após 240 dias de incubação em função da quantidade de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}) adicionada ao solo e, com e sem aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% entre relação C/N média da palha remanescente da palha nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça.

Os valores de C/N da palha variaram entre 16/1 e 40/1 após 240 dias de incubação nos tratamentos com vinhaça e entre 20/1 e 26/1 nos tratamentos sem vinhaça (Figura 25).

Ao contrário do esperado, os tratamentos com vinhaça exibiram para as doses 40, 160 e 240 mg cm^2 de palha (4, 16 e 24 t ha^{-1}, respectivamente) maiores valores de relação C/N, o que confrontando com os resultados de C remanescente na palha (Figura 19) indica que houve liberação de N maior nesses tratamentos, ou seja, mineralização de parte do N anteriormente imobilizado, o que não é sinônimo de mineralização líquida de N.

O comportamento da relação C/N do solo foi semelhante ao da relação C/N da palha, em que os tratamentos com quantidades de palha iguais a 160 e 240 mg cm^{-2} (16 e 24 t ha^{-1}, respectivamente) apresentaram diferenças para a relação C/N em função da aplicação ou não de vinhaça (Figura 26). Também apresentou semelhança para o caso do efeito significativo da quantidade de palha inicialmente depositada sobre o solo somente ter sido observada nos tratamentos com vinhaça.

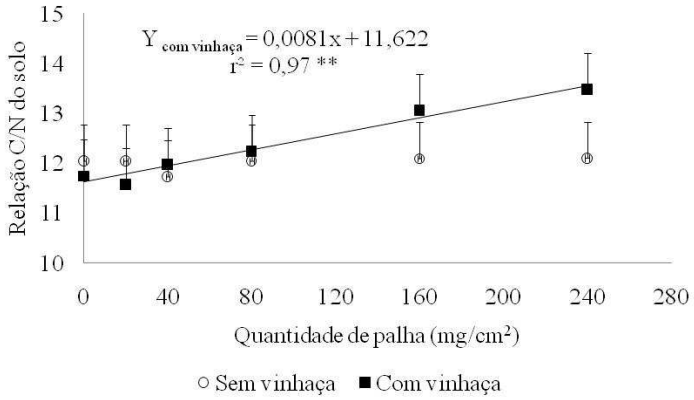


Figura 26. Relação carbono/nitrogênio no solo após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}), sem e com aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% da relação C/N média do solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça**.**

O nitrogênio possui ciclo que apresenta uma dinâmica complexa devido as suas múltiplas transformações químicas, muitas vezes mediadas por componentes bióticos, principalmente microrganismos (VITTI et al., 2007). Desse modo, após 240 dias o nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) no solo apresentou comportamento linear decrescente em função da quantidade de palha, ou seja, quanto maior a quantidade de palha menor a quantidade de nitrato (Figura 27). Esse comportamento foi independente da aplicação de vinhaça.

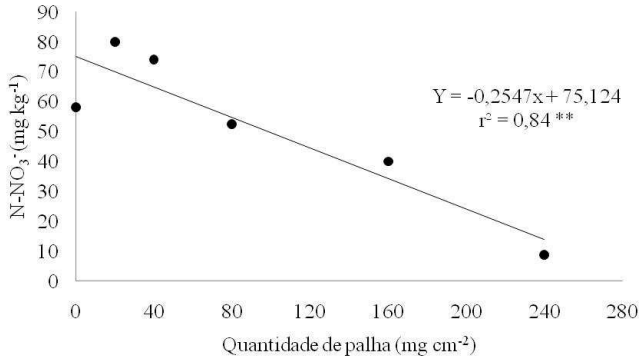


Figura 27. Nitrogênio no solo na forma de $N\text{-}NO_3^-$ após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}).

O teor de amônio ($N\text{-}NH_4^+$) no solo foi influenciado pelos dois fatores estudados, sendo que houve comportamento crescente do teor com a quantidade de palha na presença de vinhaça e não foi possível identificar o comportamento do amônio em função da palha na ausência da aplicação de vinhaça (Figura 28).

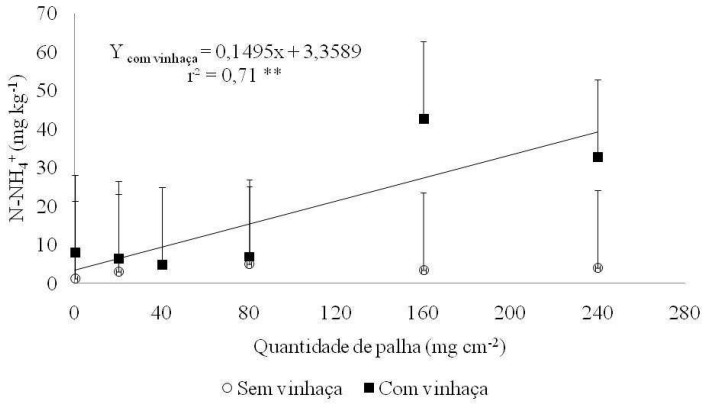


Figura 28. Nitrogênio no solo na forma de $N\text{-}NH_4^+$ após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}), sem e com aplicação de vinhaça. Barras verticais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey 5% da média do $N\text{-}NH_4^+$ do solo nos tratamentos com e sem aplicação de vinhaça**.**

A aplicação de vinhaça promoveu maiores teores de $N\text{-}NH_4^+$ somente nas maiores quantidades de palha (160 e 240 mg cm^{-2}), o que corrobora com os resultados da relação C/N do solo (Figura 26) e teores de C no solo (Figura 20).

O N inorgânico é somatório de nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) e amônio ($N\text{-}NH_4^+$), sendo que o comportamento verificado foi semelhante ao do $N\text{-}NO_3^-$, o que se deve à predominância do nitrato em relação ao amônio no solo com quantidades de palha até 80 mg cm^{-2} (Figura 29). Nestes tratamentos os teores de $N\text{-}NO_3^-$ foram de 11 a 49 vezes maiores do que os de $N\text{-}NH_4^+$ e na presença de vinhaça essa proporção foi de 7 a 16 vezes.

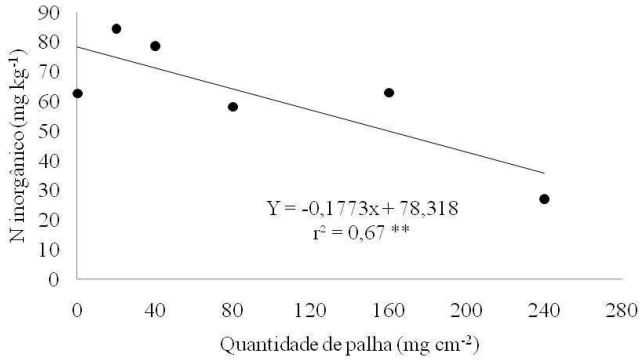


Figura 29. Nitrogênio inorgânico no solo, somatório da forma de $N\text{-}NO_3^-$ e $N\text{-}NH_4^+$ após 240 dias em função das quantidades de palha (0, 20, 40, 80, 160 e 240 mg cm^{-2}).

Para as duas maiores quantidades de palha há inversão entre as formas de N, ou seja, teores de $N\text{-}NH_4^+$ superiores aos de $N\text{-}NO_3^-$, o que pode ser indicativo de períodos de anaerobiose durante a incubação.

5 CONCLUSÕES

i. A taxa de decomposição da palha não é alterada em função da quantidade inicialmente depositada sobre o solo, tanto em condição de campo, como em condição controlada de laboratório;
ii. A decomposição da palha de cana-de-açúcar é de 66% no primeiro ciclo e de 25% no segundo ciclo de desenvolvimento da cultura após o aporte em função da colheita e o processo é caracterizado pelo metabolismo predominante de hemicelulose e celulose no primeiro ciclo e de lignina no segundo ciclo, resultando em material remanescente enriquecido em lignina e com relação C/N baixa (20/1); e
iii. A aplicação de vinhaça acelera a decomposição da palha de cana-de-açúcar mantida sobre o solo e potencialmente proporciona o dobro de entrada de carbono para o solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S.; RECOUS, S.; REYES, V.; OLIVER, R. Mineralisation of C and N from root; stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. **Biology and Fertility of Soils** 42: 119-128, 2005.

ABRAMO FILHO, J. Decomposição da palha de cana-de-açúcar em canavial colhido sem queima, mecanicamente. 1995. 91 p. Dissertação (Mestrado em Biociências) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 1995.

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, n.67, p.23-25, 1993.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.601-612, 2003.

ALEXANDER, A.G. Evaluation of sugar-enzyme relationships among twelve Puerto Rico sugarcane varieties**. J. Agric. Univer.** PR.,51 (1): 29–38, 1967.

ALVARENGA, C. R.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C. SANTANTA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, v. 4, p. 955-966, 2001.

AQUINO, G.S. Desenvolvimento e produção de cana-de-açúcar em sistema sob palhada. 2012, 86 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, PR, 2012.

AQUINO, G.S.; MEDINA, C.C. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar sob doses de palhada. 3º Seminário de Gestão Ambiental na Agropecuária. Bento Gonçalves – RS, Brasil, 25 a 27 de Abril de 2012.

AUSTIN, A.T.; BALLARÉ, C.L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, v. 107, n. 10, p. 4618-4622, 2010.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, V.S.B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. Agronomy Journal, v.85, p.1004-1008, 1993.

BENEDETTI, M. M. Palhada de cana-de-açúcar em condição de cerrado: decomposição e disponibilidade de nutrientes. 2014.78p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Pós Graduação da Universidade de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2014.

BLACK, C. A. **Soil-plant relationships**. Nem York: John Wiley, 1968. 792 p.

BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 9, p. 179-85, 1975.

CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, n.1, p. 99-108, 2005.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In. SANTOS, G. A. & CAMARGO, F. A. O. eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **GENESIS**, 1999, p27-40.

CAMARGO, O.A; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 90p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, D.C. Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono. 2003. 103p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CANELLAS, 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 palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 935- 944, 2003.

CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M. & OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane**. Eur. J. Soil Sci**., 61:375-383, 2010.

CANTARELLA, H. & TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio total em solo. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. p.262-269.

CARVALHO, A.M; DANTAS, R. A.; COELHO, M.C.; LIMA, W.M.; SOUZA, J.P.S.P.; FONSECA, O.P.; GUIMARÃES JÚNIOS, R. Teores de hemicelulose, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para o sistema plantio direto no cerrado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 290. Embrapa Cerrado. Planaltina-DF. 2010.

CASSMAN, K.G. & MUNNS, D.N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture temperature and depth. **Soil Sci. Soc**. Am. J., 44:1233-1237, 1980.

CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa. Disponível em: <http://www.cenbio.org.br >. Acesso em: 05 jan. 2015.

CERRI, C. E. P.; SPAVOREK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Agricultura tropical e aquecimento global: impactos e opções de mitigação. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 1, p. 83-89, 2007 (Revisão).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). NORMA CETESB P4.231 - Vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de. cana-de-açúcar, V. 1 – Safra 2014/15, N.3 – Terceiro Levantamento, Brasília, p. 1-27, dez. 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 03 jan. 2015.

COSCIONE, A. R.; ANDRADE, C. A. **Protocolos para avaliação da dinâmica de resíduos orgânicos no solo**. In: ANDRADE, J. C.; ABREU, M. F. Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais. Campinas: Instituto Agronômico, p.159-177, 2006.

DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Cellulase activity of soils. **Soil Biology & Biochemistry** ,v. 26, p. 1347-1354, 1994.

DENG, S.P.; TABATABAI, M.A. Cellulase activity of soils. ***Soil Biol. Biochem***., 26: 1347-1354, 1994.]

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S. A.; FILHO, R.M.; ROSELL, C. E.V.; MACIEL, M. R. W. Production of bioethanol and other bio-base materials fron sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engeneering Research & Design**, v. 87, p. 1206-1216, 2009.

DIETRICH G. Decomposição e liberação de nitrogênio da palha de cana-de-açúcar em função do ambiente e quantidade de palha. 2014, 58 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais - UFSM, Santa Maria, RS, 2014.

DOMINY C. S.; · HAYNES R. J. ;· VAN ANTWERPEN R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, n. 5, p.350–356, 2002.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. Statespace approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola** 56: 1215- 1221. 1999.

FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MANZONI, C. S.; PENATTI, C. P.; TRIVELIN, P. C. O. Degradação da palha (15N) de cana-de-açúcar em dois anos consecutivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP; SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

FERREIRA, D. F. Manual do sistema Sisvar para análises estatísticas. Lavras: UFLA, Departamento de Ciências Exatas, 2000. 66 p.

FORTES, C. Produtividade de cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e da decomposição da palhada em ciclos consecutivos. 2010, 153 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2010.

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.

FREITAS, S. P.; OLIVEIRA, A.R.; FREITAS, S.J.; SOARES, L.M.S. Controle químico de *Rottboelia exaltata* em cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa, v.22, n.3, p.461-466, 2004.

FURLANI NETO, V. L. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.94, n.3, p.8-9, 1994.

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.

GALVÃO, F.; ZILLER, S.R.; BRUFREN, A.M. Decomposição foliar de algumas espécies arbóreas. **Revista Setor Ciências Agrárias**, v.11, n.1-2, p161-168, 1989/1991.

GLÓRIA, N.A. da. Utilização da vinhaça. **Brasil Açucareiro**, Rio de janeiro, 86(5):11-7, nov. 1980.

GONÇALVES, D. B.; ALVES, F. J. C. A legislação ambiental e o desenvolvimento sustentável no complexo agroindustrial canavieiro da bacia hidrográfica do rio Mogi - Guaçú. In: SEMINÁRIO ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE: regulação estatal e auto-regulação empresarial para o desenvolvimento sustentável, 3., Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2003. 24 p. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, S. L.SARAIVA, O. F.; FRANCHINI, J. C. TORRES, E. Decomposição de resíduos de aveia e trigo em função do tempo e do manejo do solo. Londrina: Embrapa Soja, 2010.

JANSON, S. L.; PERSSON, J. Mineralization and imobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F. J. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of American, 1982. p. 229- 252. (Agronomy, 22).

JENSEN, L.S.; SALO, T.; PALMASON,F.; BRELAND, T.A. HENRIKSEN, T.M.; BO STENBERG, B.; PEDERSEN, A.; LUNDSTROM, C.; ESALA, M. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.273, p. 307-326, 2005.

KLIEMANN, H.J.; BRAZ, A.J.P.B.; SILVEIRA, P.M. Taxa de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho Distroférrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.36, p.21-28, 2006.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. Sistema Plantio Direto: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: ANDA, 2004.

LUCA, E. F. de; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; VICENTE CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. 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, n. 2, p. 789-800, 2008

LYNCH, J.M. **Biotecnologia do solo**. São Paulo, Manole, 1986. 208p.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; COSTA, L.G. da; OTTO, R. Simulating Long-Term Effects of Trash Management on Sugarcane Yield for Brazilian Cropping Systems. **Sugar Tech**. v.16, p.164–173, 2014.

MARTINS FILHOS, M.V.; LICCIOTI, T.T.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R.B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar**. Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.8-18, 2009.

MELILLO, J.M.; ABER, J.D.; MURATORE, J.F. Nitrogen and lignin control ofhard wood leaf litter decomposition dynamics. **Ecology**, v. 63, n. 3, p.6 21-626, 1982.

MINHONI, M. T. A. & CERRI, C.C. Decomposição de Vinhaça em solo sob diferentes níveis de umidade: Liberação de CO2, formação de biomassa microbiana e Imobilização do nitrogênio adicionado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Rio de Janeiro, 11:25-30, 1987.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia do solo**. 2.d. Lavras: Ed. Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2006.729p.

MYERS, R.J.K.; PALM, C.A.; CUEVAS, E.; GUNATILLEKE, I.U.N. & BROSSARD, M. The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. In: WOOMER, P.L. & SWIFT, M.J., eds. The biological management of tropical soil fertility. New York, Wiley-Science Publications, 1994. p.81-116.

NG KEE KWONG, K.F. & DEVILLE, J. Residual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane in Mauritius. **Fertilizer Research**, v. 14, p. 219-226, 1987.

OLIVEIRA M. W.; TRIVELIN P. C. O.; GAVA G.J.C., PENATTI C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, vol.56 n.4 Piracicaba Oct./Dec. 1999.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P.C.O.; KINGSTON, G.; BARBOSA, M.H.P.; VITTI, A.C. Decomposition and release of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHONOLOGISTS, 24., Cairns, 2002. **Proceedings**. Cairns: D.M. Hogarth, 2002. p.40.

ORLANDO FILHO, J.; LEME, E.J.A., Utilização Agrícola dos Resíduos da Agroindústria Canavieira, Simpósio Sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira, Brasília, DF, Anais, p.451-475, 1984.

OSHER, L.J., MATSON, P.A., AMUNDSON, R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. **Biogeochemistry**, v. 65, n. 2, p. 213-232, 2003.

PENATTI, C. P. Avaliação nutricional em cana colhida sem a queima da palha. Relatório Interno Copersucar-RT974. Copersucar, Piracicaba-SP, 1999. 36p.

PENATTI, C. P.; FORTI, J. A. Doses de vinhaça versus doses de nitrogênio em cana-soca. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Copersucar, 1997. p. 328-339.

PENATTI, C.P. et al. Doses de nitrogênio em cana planta. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., Piracicaba. **Anais**… Piracicaba: Centro de Tecnologia da COPERSUCAR, 1997. p.340-349.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001, 285p.

RAZAFIMBELO, T., BARTHES, B., LARRE-LARROUY, M. C., DE LUCA, E. F., LAURENT, J. Y., CERRI, C.C., FELLER, C., 2006. Effect of sugarcane residue management

(mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agric. Ecosyst. Environ.** 115, 285–289. 2006.

RIPOLI, T. C.; MOLINA JUNIOR, W. F.; STUPIELLO, J. P.; NOGUEIRA, M. C.; SACCOMANO, J. B. Potencial Energetico de Residuos de Cosecha de lacaña verde. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.10, n.1, p.22-28, 1991.

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.

RODELLA, A.A.; ZAMBELLO Jr., E. & ORLANDO FILHO, J. Effects of vinasse added to soil on pH and exchangeable aluminum content. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 18., La Habana, 1983. **Proceedings.** La Habana, 1983. p.189-214.

RODRIGUES, J.C.S.; PENA, M.J.; MORAES, R.S. Complementação nitrogenada em áreas fertilizadas com vinhaça. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA: MANEJO E ADUBAÇÃO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 3., 1984, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: COPERSUCAR, 1984. p.180-195.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; VITTI, A. C. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. **Informações Agronômicas**. International Plant Nutrition Institute – IPNI: Piracicaba. n. 124, p. 8-13, 2008.

ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS V. P.; CANTARELLA, H.; PRADO, R. D.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIÃO S. R.; GARCIA J. C. Cana-de-açúcar – Cultivo com sustentabilidade. **Informações Agronômicas**. International Plant Nutrition Institute – IPNI: Piracicaba. n. 142, p. 1-13, 2013.

SANGER, L.J.; COX, P.; SPLATT, P.; WHELAN, M.J.; ANDERSON, J.M. Variability in the quality of Pinus Sylvestris needles and liter from sites with different soil characteristics: lignin and phenylpropanoid signature. **Soil Biology & Biochemistry**, v.28, n.7, p.829-835,1996.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. da (Ed). Sistema brasileiro de classificação dos solos. 2. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solo, 2006. 306 p. il.

SÃO PAULO (Estado). Leis, decretos, etc. Decreto nº 47.700, de 11 de março de 2003. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, 12 mar. 2003. Seção I, v.113, n.46, p.1-2. Regulamenta a Lei nº 11.241 de 19 de setembro de 2002 que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas.

SÃO PAULO (Estado). Leis, decretos, etc. Decreto nº 57.042, de 6 de junho de 2011. **Diário Oficial do Estado de São Paulo,** 7 de junho de 2011. Seção I, v. 121. n.106. Introduz

alteração no Regulamento do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação – RICMS.

SEYBOLD C.A., MAUSBACH M.J., KARLEN D.J. AND ROGERS H.H. 1998. Quantification of soil quality. In: Lal R., Kimble J.M., Follet R.F. and Stewart B.A. (eds.). Advances in Soil Science CRC Press. Boca Raton. Florida pp. 387-404. 1998.

SIBCS, SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 3ªed. rev. amp. 353p. Brasília-DF. Embrapa, 2013.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A.C. Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos. 3.d. Viçosa: UFV, 2006.235p.

SINGH, P.; SUMAN,A.; TIWARI, P.; ARYA, N.; GAUR, A.; SHRIVASTAVA, A.K. Biological pretreatment of sugarcane trash for its conversion to fermentable sugars. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Oxford, v. 24, p. 667 – 673, 2008.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo**: fundamentos e perspectivas. Brasília: MEC; ABEAS; ESAL; FAEPE, 1988. 236 p.

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

SMEETS, E.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A.; WALTER, A.; DOLZAN, P.; TURKENBURG, W. The sustainability of Brazilian ethanol - An assessment of the possibilities of certified production. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 8, p. 781– 813, 2008.

SOUZA Z. M. de, PRADO R. M., PAIXÃO A. C. S., CESARIN L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. Pesq.agropec. bras., Brasília, v.40, n.3, p.271-278, mar. 2005.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. **Soil Science Society of American Journal**, v. 65, n. 5, p. 1479-1486, 2001.

SZAKÁCS, G.G.J. Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-açúcar: efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil. 2007. 105p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 719 p.

TASCA, F. A. Volatilização de amônia a partir da aplicação de duas fontes de nitrogênio, em laboratório. 2009. 50f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias/UDESC, Lages, 2009.

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.

TIMM, L. C. Efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar nas propriedades físico húmicas de um solo. Piracicaba, 2002. 115p. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

TRINSOUTROT, I.; RECOUS, S.; BENTZ, B.; LINÈRES, M.; CHÈNEBY N.B. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under non-limiting nitrogen conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 918-926, 2000.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. & RODRIQUES, J.C. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-^{15}N e aplicado ao solo em complemento à vinhaça**. Pesq. Agropec. Bras**, 30:1375-1385, 1995.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO – ÚNICA – 2008. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.asp?mmdCode=BF39B10A-8E01-4557-916A C9E04BA61F91>. Acesso em: 02/02/2015.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO – ÚNICA. Notícia. São Paulo fecha safra 2013/2014 com colheita mecanizada em 83% dos canaviais. <http://www.unica.com.br/noticia/65515849203106212 54/sao-paulo-fecha-safra-2013-por-cento2F2014-com-colheita-mecanizada-em-83-por-cento-dos-canaviais/> (Acesso em: 12 dezembro 2014). 2014.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA – UDOP. Características agronômicas das variedades RB. São Carlos: Universidade federal de São Carlos centro de ciências agrárias UFCAR, 2009. Programa de melhoramento genético de cana-de-açúcar- PMGCA. Disponível em:. Acessado em: 20 jan. 2015.

VAN SOEST, P. J. Use of detergent in the analysis of fibrous feeds. Preparation of fiber residues of low nitrogen content. **Journal Association of Official Analytical Chemists,** Washington, DC, v. 46, p. 825-835, 1963.

VICTORIA, R. L., PICCOLO, M. C., VARGAS, A. A. T. O ciclo do nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.B.N., TSAI, S.M., NEVES, M.C.P. (Eds). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. Cap.8, p.105-119.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H., FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; TRIVELIN, M. O.; TOALIARI, J. G. Mineralização da palhada e desenvolvimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Campinas, v. 32, n. esp., p. 2757-2762, 2008.

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

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOALIARI; J.G. Influência de doses de N sobre a mineralização e quantificação de raízes junto à palhada-15N de cana-de-açúcar. In: congresso brasileiro de ciência do solo, 2007, Gramado. **Anais…**Viçosa : SBCS, 2007. v. 31. p. 1-5. (CD-ROM).

WISNIEWSKI, C & HOLTZ, G. P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia-soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 1191-1197, 1997.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in North Queensland. **Soil and Tillage Research**, v. 20, p. 69-85, 1991.

ZOTELLI, L. C. Palha e vinhaça: emissões de CO2, N2O e CH4 em solo com cana-de-açúcar. Dissertação (Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical). 77 p. Pós Graduação do Instituto Agronômico. Campinas-SP. 2012.