

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE AGRONOMIA**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
CIÊNCIA DO SOLO**

**TESE**

**Balanço de Gases de Efeito Estufa em Área de  
Cultivo de Cana-de-açúcar**

**Selenobaldo Alexinaldo Cabral de Sant'Anna**

**2013**



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

**BALANÇO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREA DE CULTIVO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**SELENOBALDO ALEXINALDO CABRAL DE SANT'ANNA**

*Sob a Orientação do Pesquisador*  
**Bruno José Rodrigues Alves**

*e Co-Orientação do Professor*  
**Robert Michael Boddey**

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

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2013

631.4  
S232b  
T

Sant'Anna, Selenobaldo Alexinaldo Cabral de, 1971-  
Balço de gases de efeito estufa em área de cultivo de cana-  
de-açúcar / Selenobaldo Alexinaldo Cabral de Sant'Anna. –  
2013.  
77 f.: il.

Orientador: Bruno José Rodrigues Alves.

Tese (doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do  
Solo, 2013.

Bibliografia: f. 67-77.

1. Solo - Uso – Teses. 2. Gases estufa - Teses. 3. Cana-de-  
açúcar - Cultivo - Teses. 4. Cana-de-açúcar – Adubos e  
fertilizantes - Teses. 5. Carbono – Teses. 6. Nitrogênio –  
Teses. I. Alves, Bruno José Rodrigues, 1966- II. Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em  
Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

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

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

**SELENOBALDO ALEXINALDO CABRAL DE SANT'ANNA**

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

TESE APROVADA EM 25/02/2013

---

Bruno José Rodrigues Alves. Dr. EMBRAPA AGROBIOLOGIA  
(Orientador)

---

Eduardo Lima. Dr. UFRRJ

---

David Vilas Boas de Campos. Dr. EMBRAPA SOLOS

---

Denizart Bolonhezi. Dr. APTA Centro Leste- SP

---

Claúdia Pozzi Jantalia. Dr<sup>a</sup>. EMBRAPA AGROBIOLOGIA

*"Nunca se afaste de seus sonhos, pois se eles se forem, você continuara vivendo, mas terá deixado de existir".*

*Charles Chaplin*

*A DEUS;  
A minha família;*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta conquista e iluminação dos caminhos percorridos até o presente.

Aos meus pais Vilobaldo Agostinho de Sant`Anna e Ivone Gonzaga Cabral de Sant`Anna, por serem os pilares da minha vida.

Aos meus irmãos Siomara, Salete, Fausta, Agostinho, Vilobaldo, Sandra, aos meus Tios Juca, Celeste, Nita, Salmão, Miguel, aos meus cunhados João, Anderson, Adriana, Francisca, Ailton e todos os sobrinhos queridos e amigos da minha mãe (Helenice, Eliane, Arlinda, Anselmo, Telma, Berna, Meire), por entenderem o meu esforço e me passarem os subsídios da fé, espiritualidade e otimismo.

Ao Dr Denizart Bolonhezi, esposa Maria Lúcia e filho Matheus, por me acolherem em Ribeirão Preto e amizade verdadeira.

A Andréa da Silva Gomes, pelo carinho, companheirismo, cumplicidade e amor (Amo você!).

A Dona Cláudia, Ângela e Adriano, por colaboração, alegria e carinho.

As inesquecíveis amigas Jacqueline Oliveira e Érica Verena, pelas conversas, carinho e confiança.

Aos meus queridos amigos da Embrapa Agrobiologia e doutorado: Fernando Zuchello, Sandra Lima, Ana Paula Guimarães, Alessandro de Paula, Natália Zatorre, Jakson, Lenilson, Débora Paredes, Carolina Lessa, Paula Fernanda, Roselaine Sánchez, Walter, Ana Paula Pessin e Roger, Rafael Butke, Abmael, Josimar, Rangel, Luciano, Jerusa, Talita, Elisamara, Márcio Martins, Silvana, Helder, Khadidja, Gabriela, Flávia, Sílvio Santos, Rosana, Willian Oliveira e Willian Pereira, Péricles (“in memoriam”), pela colaboração e pelos agradáveis momentos juntos.

Aos funcionários da Embrapa, Roberto Grégio, Selmo, Altiberto, Renato Moutinho, Andreia Loviane, Monalisa, Ednelson, Gisele, Ernani, Aurélio, Alderi, Roberto Carlos, Eugênio, Oséas, Heitor, Jorge, Carmelita, Joyce pela colaboração em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em especial aos professores e a todos os funcionários da Coordenação do Curso de Pós Graduação em Agronomia - Ciência do Solo e do Departamento de Solos.

A Embrapa Agrobiologia, pela oportunidade e apoio no desenvolvimento dos trabalhos.

Ao CNPq pela Bolsa de Doutorado.

A prof<sup>a</sup>. Marly Magalhães Franco da UFS e ao Dr. Marcelo Fernandes da Embrapa Tabuleiros Costeiros, pelos ensinamentos e otimismo passados ao longo da graduação e mestrado.

Aos Pesquisadores Dr. Bruno José Rodrigues Alves, Dr. Robert Michael Boddey, Dr. Segundo Urquiaga, Dr<sup>a</sup> Cláudia Jantalia pela orientação nesse trabalho e por todo apoio, amizade, confiança e ensinamentos de sempre.

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho,

Muito Obrigado!

## **BIOGRAFIA**

Selenobaldo Alexinaldo Cabral de Sant'Anna, filho de Vilobaldo Agostinho de Sant'Anna e Ivone Gonzaga Cabral de Sant'Anna, nasceu em 12 de Abril de 1971, na cidade de Salvador, Estado da Bahia. É formado em Biologia Bacharelado pela Universidade Federal de Sergipe, possui Mestrado em Agroecossistemas pela mesma IEF, onde foi Bolsista CNPq e desenvolveu as atividades do Mestrado na Embrapa Tabuleiros Costeiros. Em março de 2009 ingressou no Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo da UFRRJ, onde foi Bolsista CNPq e desenvolveu as atividades da tese na Embrapa Agrobiologia.

## RESUMO GERAL

SANT'ANNA, Selenobaldo Alexinaldo Cabral de. **Balço de gases de efeito estufa em área de cultivo de cana-de-açúcar** 2013. 77f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

O trabalho teve como objetivo avaliar as mudanças nos estoques de C e N no solo em área de cana-de-açúcar cultivada sem queima em área antes ocupada por pastagem e quantificar as emissões de gases ( $N_2O$  e  $CH_4$ ) e as perdas por volatilização de amônia do solo pelo uso de fertilizante e vinhaça. O estudo foi realizado em uma área de LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), textura argilosa, no Município de Ribeirão Preto-SP. Para avaliação dos estoques de C e N foi considerada uma cronosequência com duas áreas de cana-de-açúcar, uma com mais de 25 anos e outra com 3 anos de cultivo respectivamente, e uma área ocupada com pastagem e outra com floresta secundária com mais de 30 anos. Os estoques de C e N foram estimados para as camadas de 0-30 cm e de 0-100 cm. Não houve diferença estatística para a profundidade 0-30 cm corrigido para massa igual de terra entre a floresta, pastagem e cana 3 anos, que somaram, respectivamente, 55,05, 48,85 e 49,96 Mg C ha<sup>-1</sup> e 4,27, 3,74 e 3,83 Mg N ha<sup>-1</sup>. A área sob cana > 25 anos para esse intervalo de profundidade apresentou estatisticamente menores valores dos estoques de C (46,04 Mg C ha<sup>-1</sup>) e N (3,45 Mg N ha<sup>-1</sup>) em relação a floresta secundária, porém esses valores não diferiram dos outros dois sistemas de uso do solo. Na camada 0-100 cm a floresta apresentou valor significativamente maior (118,36 Mg C ha<sup>-1</sup>) do que as áreas de cana > 25 anos (103,25 Mg C ha<sup>-1</sup>) e a pastagem (102,29 Mg C ha<sup>-1</sup>). A área de cana com 3 anos apresentou estoque de C (109,97 Mg C ha<sup>-1</sup>) que não diferiu entre os três outros sistemas. A floresta e a cana com 3 anos apresentaram maiores estoques de N, respectivamente (8,52 e 8,02 Mg N ha<sup>-1</sup>), comparada com a área de cana > 25 anos (7,04 Mg N ha<sup>-1</sup>), mas não diferente da área de pastagem (7,79 Mg N ha<sup>-1</sup>), a qual não diferenciou da área de cana > 25 anos. Para as amostragens de gases e as perdas por volatilização de  $NH_3$  o trabalho foi realizado em delineamento experimental em bloco inteiramente casualizado, com seis tratamentos: CSP - controle sem palha, FSP - fertilizante sem palha, FCP - fertilizante com palha, CCP - controle com palha, VSP - vinhaça sem palha e VCP - vinhaça com palha e com cinco repetições e em três períodos de amostragens correspondentes aos anos de 2010, 2011 e 2012. Os tratamentos consistiram na aplicação de 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça equivalente a 59 kg N ha<sup>-1</sup> em 2010, a 70 kg N ha<sup>-1</sup> em 2011 e a 108 kg N ha<sup>-1</sup> em 2012, aplicação de ureia na dose de 52 kg N ha<sup>-1</sup> em 2010 e 100 kg N ha<sup>-1</sup> em 2011 e 2012 e controles. A variação temporal dos fluxos de  $N_2O$  nos três anos foi 5,12 a 42,49  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^2 \text{ h}^{-1}$ . Em 2010 não houve diferença entre tratamentos e em 2011 e 2012 seguiram a ordem FSP = FCP > CSP = CCP = VCP = VSP. Os fatores de emissão variaram entre 0,01 e 0,4%. Os fluxos médios de  $CH_4$  foram negativos. As perdas por volatilização de  $NH_3$  nos três anos de avaliação foram menores que 15% e 2% para as doses de fertilizantes e vinhaça respectivamente. Os resultados sugerem que o plantio da cana-de-açúcar em áreas de pastagens de baixa produção não modifica significativamente os estoques de C e N do solo, mas alcançam níveis inferiores aos da floresta secundária (>30 anos). O uso da fertilização nitrogenada induz a produção de  $N_2O$  do solo, assim como tende a ocorrer com a aplicação da vinhaça, e mesmo com a manutenção da palhada, os níveis de emissão são muito baixos para se atribuir a essas operações um risco de comprometimento do programa de etanol.

**Palavras chave:** Estoques C e N. Fertilizante. Vinhaça. Palhada.  $N_2O$  e  $CH_4$ .

## GENERAL ABSTRACT

SANT'ANNA, Selenobaldo Alexinaldo Cabral de. **Balance of greenhouse gases in a sugarcane production area** 2013. 77p. Thesis (Doctor Science in Agronomy, Soil Science) – Agronomy Institute, Soils Department, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

The study aimed to evaluate the changes in the soil stocks of C and N under non-burnt sugarcane grown in an area previously with pasture, and to quantify greenhouse gas emissions ( $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ ) and ammonia volatilization losses when using fertilizer and vinasse. The study was conducted in an area of a clayey Oxisol (LVef) in Ribeirão Preto-SP. For the evaluation of C and N it was considered a chronosequence of two sugarcane areas, with 3 and 25 years of cultivation, and areas with pasture and over 30 years secondary forest. The stocks of C and N were estimated for the 0-30 cm and 0-100 cm layers. There was no statistical difference for the depth 0-30 cm, after correction for soil equal mass between forest, pasture and sugarcane of 3 years, which amounted to, respectively, 55.05, 48.85 and 49.96  $\text{Mg C ha}^{-1}$  and 4.27, 3.74 and 3.83  $\text{Mg N ha}^{-1}$ . The area under the > 25 years sugarcane, for this depth range, showed statistically lower values of C stocks (46.04  $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) and N (3.45  $\text{Mg N ha}^{-1}$ ) compared to secondary forest; but these values did not differ from the other two systems of land use. In the 0-100 cm layer, the forest showed a value significantly higher (118.36  $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) than the > 25 years sugarcane (103.25  $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) and the pasture (102.29  $\text{Mg C ha}^{-1}$ ). The C stock (109.97  $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) in the 3 years sugarcane did not differ from the other systems. The forest and the 3 years sugarcane had higher N stock, respectively 8.52 and 8.02  $\text{Mg N ha}^{-1}$ , when compared with the sugarcane > 25 years (7.04  $\text{Mg N ha}^{-1}$ ), but they were not different from the pasture (7.79  $\text{Mg N ha}^{-1}$ ), which was not different from the > 25 years sugarcane. For sampling of gases and volatilization losses of  $\text{NH}_3$ , a study was conducted in a completely randomized block design with six treatments: CSP-control without straw, FSP-fertilizer without straw, FCP-fertilizer with straw, CCP-control with straw, VSP-vinasse without straw and VCP-vinasse with straw, with five replications and three sampling periods in the years 2010, 2011 and 2012. The treatments consisted of applying 160  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  equivalent to 59  $\text{kg N ha}^{-1}$  vinasse in 2010, 70  $\text{kg N ha}^{-1}$  in 2011, and 108  $\text{kg N ha}^{-1}$  in 2012, application of urea at a dose of 52  $\text{kg N ha}^{-1}$  in 2010, and 100  $\text{kg N ha}^{-1}$  in 2011 and 2012, and controls. The temporal variation of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in the three years was from 5.12 to 42.49  $\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^2 \text{h}^{-1}$ . In 2010 there was no difference among treatments, and in 2011 and 2012 it followed the FSP = FCP > CSP = CCP = VCP = VSP order. The emission factors ranged from 0.01 to 0.4%. The average flow rates of  $\text{CH}_4$  were negative. The  $\text{NH}_3$  volatilization losses in the three years of evaluation were less than 15% and 2% for doses of fertilizers and vinasse, respectively. The results suggest that the planting of sugarcane in pastures with low production does not significantly modify the stocks of C and N in the soil, although they reach values below the secondary forest (> 30 years) ones. The usage of nitrogen fertilization induces the production of  $\text{N}_2\text{O}$  from the soil; the same tends to occur with vinasse application. Also, even with the maintenance of the straw, the emission levels are too low to be credited to these practices a risk of compromising the ethanol program.

**Keywords:** C and N stocks. Fertilizer. Vinasse. Straw.  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ .

## ÍNDICES DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Densidade do solo para os diferentes intervalos de profundidade das áreas amostradas sob floresta secundária, pastagem, cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo e cana-de-açúcar com >25 anos de cultivo em Ribeirão Preto-SP.....	22
<b>Tabela 2.</b> Estoque* de Carbono e Nitrogênio do solo em área sob cana-de-açúcar cultivada a 3 anos ou > 25 anos, antes da amostragem, área de pastagem e Floresta secundaria em Ribeirão Preto-SP.....	26
<b>Tabela 3.</b> Resultado da análise química de terra antes da implantação do experimento no Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto-SP (07-10-2010).....	36
<b>Tabela 4.</b> Resultado da análise química de terra antes da implantação do experimento no Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto-SP (11-08-2011).....	37
<b>Tabela 5.</b> Resultado da análise químicas da vinhaça no momento da aplicação. ....	37
<b>Tabela 6.</b> Emissões realizadas e emissões evitadas de gases de efeito estufa, GEE (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O e CH <sub>4</sub> ) durante as etapas de produção e distribuição de etanol de cana-de-açúcar (SOARES et al., 2009). ....	59
<b>Tabela 7.</b> Emissões e drenos de gases de efeito estufa, GEE (N <sub>2</sub> O e CH <sub>4</sub> ) durante fase de produção de cana-de-açúcar. ....	60
<b>Tabela 8.</b> Variação de temperatura, chuva e EPSA em relação ao ano de avaliação. ....	61
<b>Tabela 9.</b> Fluxos de N-N <sub>2</sub> O médios e total (µg N-N <sub>2</sub> O m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> ) e dose de N aplicada (kg N ha <sup>-1</sup> ) em 2010. ....	62
<b>Tabela 10.</b> Fluxos de N-N <sub>2</sub> O médios e total (µg N-N <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) e dose de N aplicada (kg N ha <sup>-1</sup> ) em 2011. ....	62
<b>Tabela 11.</b> Fluxos de N-N <sub>2</sub> O médios e total (µg N-N <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) e dose de N aplicada (kg N ha <sup>-1</sup> ) em 2012. ....	63
<b>Tabela 12.</b> Fluxos de C-CH <sub>4</sub> médios e total (g C-CH <sub>4</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) e dose de N aplicada (kg N ha <sup>-1</sup> ) em 2011. ....	63
<b>Tabela 13.</b> Fluxos de C-CH <sub>4</sub> médios e total (g C-CH <sub>4</sub> m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> ) e dose de N aplicada (kg N ha <sup>-1</sup> ) em 2012. ....	64

## ÍNDICES DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fluxograma simplificado da produção de açúcar e álcool e dos produtos oriundos da dessa produção (Adaptado da UNICA, 2011). .....	11
<b>Figura 2.</b> Mapa do Brasil com destaque para Estado de São Paulo e imagem aérea IAC-APTA Ribeirão Preto-SP (Fotos aérea Google Earth em 25-01-2012). .....	17
<b>Figura 3.</b> Histórico de mudança do uso da terra referente às áreas: Área 1: Cana > 25 anos, Área 2: Pastagem, Área 3: Floresta secundária e Área 4: Cana de 3 anos .....	18
<b>Figura 4.</b> Textura do solo para diferentes camadas em área de Cana-de-açúcar 3 anos, Cana-de-açúcar com mais de 25 anos, Pastagem e Floresta secundária em Ribeirão Preto SP. 21	
<b>Figura 5.</b> Conteúdo total de C e N ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. ....	23
<b>Figura 6.</b> Relação C/N ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. ....	24
<b>Figura 7.</b> Abundância natural de $^{13}\text{C}$ ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do solo ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. ....	25
<b>Figura 8.</b> Fotos área experimental IAC-APTA Ribeirão Preto (fotos Selenobaldo Sant'Anna). .....	35
<b>Figura 9.</b> Distribuição da precipitação mensal e temperaturas máximas, mínimas e médias em Ribeirão Preto (SP). Os dados referem-se ao período de 2000 a 2012 (SAA/IAC/CIAGRO, 2012). .....	36
<b>Figura 10.</b> Croqui detalhado da câmara coletora de $\text{N}_2\text{O}$ da unidade experimental. ....	38
<b>Figura 11.</b> Esquema do sistema coletor de $\text{N-NH}_3$ semi aberto estático –SALE .....	41
<b>Figura 12.</b> Distribuição da precipitação (Barras verticais) e percentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 04/10/2010 a 06/12/2010. ....	42
<b>Figura 13.</b> Fluxos médios diários de óxido nitroso para os tratamentos avaliados durante o primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. ....	43
<b>Figura 14.</b> Variação da concentração do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo (0-10 cm) primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. ....	44
<b>Figura 15.</b> Variação da concentração do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo (0-10 cm) primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. ....	45
<b>Figura 16.</b> Perdas por volatilização de amônia período de 04/10/2010 a 06/12/2010. ....	46
<b>Figura 17.</b> Distribuição da precipitação - ppt (mm) e percentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 12/08/2011 a 20/11/2011. ....	46
<b>Figura 18.</b> Fluxos médios diários de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) para os tratamentos avaliados durante o segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. ....	47
<b>Figura 19.</b> Fluxos médios diários de metano ( $\text{CH}_4$ ) para os tratamentos avaliados durante o segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. ....	49
<b>Figura 20.</b> Variação da concentração do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo (0-10 cm) segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. ....	50
<b>Figura 21.</b> Variação da concentração do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo (0-10 cm) segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. ....	51
<b>Figura 22.</b> Perdas por volatilização de amônia período de 12/08/2011 a 20/11/2011. ....	52

<b>Figura 23.</b> Distribuição da precipitação - ppt (mm) e percentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 01/11/2012 a 23/11/2012. ....	53
<b>Figura 24.</b> Fluxos médios diários de óxido nitroso ( $N_2O$ ) para os tratamentos avaliados durante o terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. ....	54
<b>Figura 25.</b> Fluxos médios diários de Metano ( $CH_4$ ) para os tratamentos avaliados durante o terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. ....	55
<b>Figura 26.</b> Variação da concentração do amônio ( $NH_4^+$ ) no solo (0-10 cm) terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. ....	56
<b>Figura 27.</b> Variação da concentração do nitrato ( $NO_3^-$ ) no solo (0-10 cm) terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. ....	57
<b>Figura 28.</b> Perdas por volatilização de amônia período de 01/11/2012 a 23/11/2012. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Expansão da Cultura da Cana-de-açúcar .....	3
2.2	Mudanças de Uso da Terra .....	4
2.3	Estoques de Carbono e Nitrogênio do Solo.....	5
2.4	Emissões de Gases de Efeito Estufa .....	7
2.5	Volatilização de NH <sub>3</sub> na Cultura da Cana-de-açúcar .....	9
2.6	Vinhaça e Fertilizantes Empregados na Cultura da Cana-de-açúcar.....	10
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO I – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR, NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO PRETO-SP .....</b>	<b>12</b>
3.1	RESUMO.....	13
3.2	ABSTRACT .....	14
3.3	INTRODUÇÃO.....	15
3.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	17
3.4.1	Condições experimentais .....	17
3.4.2	Quantificação dos estoques de C e N do solo .....	17
3.4.3	Análises realizadas .....	19
3.4.4	Análise estatística .....	20
3.5.	RESULTADOS .....	21
3.6.	DISCUSSÃO .....	27
3.7.	CONCLUSÕES .....	29
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO II – FLUXOS DE N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> E VOLATILIZAÇÃO DE NH<sub>3</sub> DO SOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR APÓS APLICAÇÃO DE UREIA E VINHAÇA EM LATOSSOLO VERMELHO EM RIBEIRÃO PRETO-SP .....</b>	<b>30</b>
4.1.	RESUMO.....	31
4.2.	ABSTRACT .....	32
4.3.	INTRODUÇÃO.....	33
4.4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.4.1.	Condições experimentais.....	35
4.4.2.	Coleta e análise de amostras de gases do solo .....	38
4.4.3.	Amostragem e análise de solo.....	39
4.4.4.	Balço de gases do solo .....	40
4.4.5.	Avaliação da volatilização de N-NH <sub>3</sub> pela aplicação vinhaça e ureia .....	40
4.4.6.	Análise estatística.....	41
4.5.	RESULTADOS .....	42
4.5.1.	Avaliações do primeiro período ano 2010.....	42
4.5.2.	Avaliações do segundo período ano 2011 .....	46
4.5.3.	Avaliações do terceiro período ano 2012 .....	52
4.5.4.	Balço de gases de efeito estufa.....	58
4.6.	DISCUSSÃO .....	61
4.7.	CONCLUSÕES .....	65
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A busca de alternativas energéticas que possam reduzir a dependência por combustíveis fósseis e, conseqüentemente, que possam contribuir para o sequestro de carbono e mitigação das emissões de gases de efeito estufa, tem sido direcionada para a matéria prima vegetal, sempre buscando estratégias de produção e transformação que requeiram menos energia e diminuam as emissões de gases originados do solo.

Partindo de diferentes fontes de biomassa e de uma grande variedade de processos, de natureza física, química e biológica é possível obter biocombustíveis a partir de plantas oleaginosas (girassol, mamona, soja, etc.), cereais (em geral trigo e milho), produtos agrícolas contendo açúcares (cana-de-açúcar, beterraba doce, etc.), resíduos agrícolas e florestais. Apesar dos esforços desenvolvidos e dos progressos que são continuamente alcançados, muitas das tecnologias e/ou os custos inviabilizam, no curto prazo, a produção e utilização de muitos desses biocombustíveis em escala comercial (MALÇA et al., 2003).

A cana-de-açúcar é uma cultura ideal para a energia renovável pelo rápido crescimento e alta produtividade de açúcar, matéria prima para o etanol. A energia fóssil necessária para o crescimento da cultura até a produção de bioetanol representa cerca de 30% da energia produzida com o biocombustível (SOARES et al., 2009). Para o processamento da cana e obtenção do etanol, os custos em energia fóssil são minimizados pela geração de energia a partir da queima do bagaço. Em função disso, o valor do balanço de energia do etanol de cana-de-açúcar tem sido estimado como 9 (MACEDO, 1998; SOARES et al., 2009), ou seja, se produz 9 unidades de energia renovável para cada unidade de energia fóssil empregada no processo, sendo um dos mais positivos comparado a outras lavouras para biocombustíveis.

A produção brasileira de cana-de-açúcar voltou a se destacar a partir do início do ano 2000 como alternativa economicamente viável para produção de bioenergia em larga escala, respondendo a três demandas da sociedade: produção de energia renovável e barata, redução das emissões de gases de efeito estufa e aumento da demanda interna por etanol devido ao crescimento da frota nacional de veículos bicombustíveis (EVANGELISTA, 2011).

Associado ao aumento da demanda por biocombustíveis de cana-de-açúcar ocorrem mudanças no uso da terra, gerando crescente preocupação sobre os efeitos em relação à qualidade do solo, água, biodiversidade e alimentos (GNANSOUNOU et al., 2008). Mesmo considerando que a expansão da cana-de-açúcar na região Centro-Sul, ocupa principalmente áreas antes destinadas a pastagens e a produção de grãos (RUDORFF et al., 2010), especula-se que pode induzir deslocamento dessas atividades para a fronteira agrícola, forçando o desmatamento e eliminando os ganhos obtidos com o etanol na economia de combustíveis fósseis (LAPOLA et al., 2010). Este efeito é conhecido como mudança indireta de uso da terra (ILUC) e tem implicações muito negativas no balanço de gases de efeito estufa devido a mudanças no estoque de carbono do solo e à emissão de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> pela retirada da biomassa florestal e adequação da terra para o plantio (GNANSOUNOU et al., 2008).

Estudos que avaliem os efeitos da cultura da cana-de-açúcar sobre os estoques de C do solo, comparando com distintos usos da terra, incluindo a vegetação nativa, são necessários. No Brasil, os principais resultados sobre o impacto da cultura foram obtidos com comparação entre colheitas com e sem a queima da palhada (CERRI et al., 2011), o que é insuficiente para avaliar o impacto da cultura no que se refere ao uso da terra. A eliminação do uso do fogo é irreversível por força de Lei, e também pelos benefícios para a saúde da população e manutenção da qualidade do solo e por isso, deve-se considerar que a linha de base para o sistema de produção de cana-de-açúcar deve incluir a colheita de cana-crua, sem queima.

Em adição a questão do C do solo, poucos resultados com medições de campo em relação às emissões de GEE do solo foram publicados, e as estimativas de balanço de GEE para o bioetanol vem sendo realizadas com fatores de emissão globais, mais especificamente com os propostos nas guias de 1996 e 2006 para inventários do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996; 2006). Alguns insumos, como a vinhaça são muito pouco conhecidos em relação às emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O após aplicação nas áreas de produção, o que alimenta dúvidas em relação aos balanços de GEE para o bioetanol publicados até o momento (LISBOA et al., 2011). De fato Smith et al. (2012), baseado em análises do tipo *top-down* dos gases de efeito estufa no planeta, sugeriram que somente as emissões de N<sub>2</sub>O no sistema de produção de cana-de-açúcar poderiam neutralizar a quase totalidade dos benefícios conseguidos com a substituição de bioetanol pela gasolina.

Vale ressaltar que a sustentabilidade ambiental associada ao biocombustível de cana-de-açúcar pressupõe um balanço energético positivo e redução nas emissões de (GEE), em comparação aos combustíveis fósseis substituídos. Para isso é necessário considerar todas as fontes emissoras ao longo de todo o ciclo produtivo da cana-de-açúcar, inclusive na gestão dos resíduos gerados na indústria, como a vinhaça.

Assim, as hipóteses de trabalho são:

O uso do solo para cultivo contínuo da cana-de-açúcar com eliminação de queima da palhada para colheita, em lugar de pastagens e lavouras de grãos, aumenta os estoques de C e N do solo.

O uso de fertilizantes nitrogenados e vinhaça na cultura da cana-de-açúcar resultam em emissões de gases de efeito estufa, porém abaixo do que seria estimado com os fatores de emissão propostos na última guia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivos:

a) Quantificar os estoques de C e N do solo em uma cronosequência de cultivo de cana-de-açúcar, renovada em sistema convencional sem queima, implantado em área anteriormente ocupada com pastagens;

b) Quantificar as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O do solo plantado com cana-de-açúcar após adição de vinhaça e ureia;

c) Avaliar os efeitos da retirada da palhada nos processos relacionados às emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O do solo cultivado com cana-de-açúcar; e

d) Avaliar atributos do solo e microclimatológicos relacionadas com as emissões de gases de efeito estufa em áreas de produção de cana-de-açúcar.

Assim, na revisão de literatura são apresentados os aspectos conceituais que orientaram a condução do trabalho como a expansão da cultura da cana-de-açúcar, mudanças de uso da terra, estoques de carbono e nitrogênio do solo, emissão de gases de efeito estufa, volatilização de NH<sub>3</sub> na cultura da cana-de-açúcar e a utilização de vinhaça e fertilizantes empregados na cultura da cana-de-açúcar.

O capítulo I aborda os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar, no município de Ribeirão Preto-SP e o capítulo II trata dos fluxos de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e volatilização de NH<sub>3</sub> do solo sob cana-de-açúcar após aplicação de ureia e vinhaça em Latossolo em Ribeirão Preto-SP.

As considerações finais enfatizam que o uso do solo com a cultura da cana-de-açúcar implica na manutenção dos estoques de C do solo caso o uso anterior tenha sido com pastagens de baixa produtividade. E que o uso da fertilização nitrogenada induz a produção de N<sub>2</sub>O do solo, assim como tende a ocorrer com a aplicação da vinhaça, e mesmo com a manutenção da palhada, os níveis de emissão são muito baixos e não afetam significativamente o balanço de gases de efeito estufa realizados para a cultura.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Expansão da Cultura da Cana-de-açúcar

Entre os fatores que contribuem para produção contínua de bicombustíveis a partir de biomassa vegetal evidenciam-se os edafoclimáticos. Neste sentido, o Brasil assume destaque, pois possui área, solo e clima adequados a produção de energia através de biomassa vegetal como plantas oleaginosas para produção de biodiesel, e de cana-de-açúcar para bioetanol.

A maturidade técnica e a aceitação no mercado, quer pelo biodiesel ou pelo bioetanol, fizeram com que ambos os produtos se tornassem os principais biocombustíveis em nível mundial, constituindo uma alternativa parcial, ou mesmo total (em determinadas situações), dos combustíveis de origem fóssil no setor de transportes (MALÇA et al., 2003). No entanto, é preciso que a produção de etanol seja acompanhada de emprego de tecnologia que reduzam as emissões dos gases de efeito estufa (GEE) gerada na produção da cana-de-açúcar no campo e no seu beneficiamento na usina (GALDOS, 2007).

O estudo de Soares et al. (2009) mostrou o enorme potencial do etanol de cana em mitigar as emissões de gases de efeito estufa, quando usado em substituição a gasolina. No entanto, os autores apontaram várias incertezas nos cálculos realizados, especialmente pela falta de informação sobre as emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) da vinhaça e dos adubos, assim como dos efeitos do uso do solo com a cultura da cana-de-açúcar, quando se expande sobre pastos e lavouras.

A expansão da cultura para novas áreas no país têm demandado estudos sobre o impacto no uso da terra, bem como da avaliação de práticas agrícolas como rotação da cultura em sistema de plantio direto.

No Brasil o cultivo de cana-de-açúcar se estabeleceu sobre as mais diferentes classes de solos do território nacional, desde Neossolos Quartzarênicos até Latossolos das mais diferentes texturas e níveis de fertilidade, sendo estes últimos, juntamente com os Argissolos, os mais representativos (SILVA; RIBEIRO, 1997). Estas classes de solos estão sob a influência de diferentes climas, o que resulta em uma diversidade de ambientes para a produção desta cultura (MAULE et al., 2001).

A dinâmica da expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil para produção de etanol é caracterizada por três fases, que ocorreram nas três últimas décadas: a primeira marcada logo após o lançamento do PROÁLCOOL, entre 1975-1986, quando houve um aumento acentuado na área de produção de cana-de-açúcar no Brasil, que é inteiramente devida à demanda de matérias-primas no mercado interno do programa de etanol. A segunda durante 1986 a 2000, em que ocorre um crescimento da produção de açúcar, mas com uma fase de estagnação na produção de etanol, que tem sido atribuída a vários fatores nacionais e internacionais, e não atribuído ao menor preço do petróleo. Por último, a expansão mais rápida das áreas de cana-de-açúcar ocorreu após o ano 2000, e em particular durante 2005 e 2008, com o aumento da frota de carros flex (motores bi-combustível, capazes de funcionar com 100% de gasolina brasileira até 100 % de etanol) e com as perspectivas de exportação do produto para os Estados Unidos e Europa. Na ocasião, o debate sobre biocombustíveis estava aquecido, além do fato de que muitos países buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de suas economias no petróleo (FISCHER et al., 2008).

O expressivo crescimento da produção de cana-de-açúcar, no Brasil, nas últimas décadas, determinou importantes mudanças no que se refere ao aspecto agroambiental. Os números do setor canavieiro impressionam pela grande extensão da área cultivada. A cana-de-

açúcar ocupa hoje por volta de 8,53 milhões de hectares (CONAB, 2012), caracterizando sistema de monocultivo com especial significado econômico e social para o país.

Com o aumento da demanda por biocombustíveis, a cultura da cana-de-açúcar se expandiu para novas áreas que antes eram ocupadas ou por pastagens degradadas ou não aproveitadas, ou por lavouras anuais, porém muito pouco em áreas de formação nativa (RUDORFF et al., 2010). Nos primeiros casos, ocorre uma substituição de usos do solo, enquanto, no último caso, podem existir impactos negativos relevantes em função da remoção da vegetação nativa (NOGUEIRA et al., 2008), considerada um dos grandes estoques de C na biosfera, embora pouco tenha sido estudado sobre esses processos.

As áreas típicas da expansão da cana-de-açúcar no Brasil tem sido principalmente o Triângulo Mineiro, o Noroeste Paulista e o Cerrado brasileiro. Essas áreas são marcadas pelo cultivo de citros, produção de grãos, como soja e café, bem como criação de gado e que agora estão voltadas também para a produção de cana-de-açúcar (MACHADO; HABIB, 2009, ZANZARINI et al., 2009).

O Estado de São Paulo é considerado o mais importante para a cana-de-açúcar, representa 51,87% da área total de cana no Brasil em 2012. Os quatro estados com maior área são: São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraná que são responsáveis por 76,03% da área total de cana no Brasil (CONAB, 2012). Coincidentemente, estes estados mais o Mato Grosso e Mato Grosso do Sul tiveram a maior área de expansão da cana-de-açúcar nos últimos anos.

Segundo Nassar et al. (2008) uma nova e promissora região para a cana-de-açúcar está localizada nos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins, no bioma Cerrado, conhecida no Brasil como a região do MAPITO. No entanto, até 2008, esses estados foram responsáveis por apenas 0,25% da área cultivada de cana no Brasil.

O sucesso da cultura da cana-de-açúcar no Sudeste do Brasil pode ser explicado pelo ambiente favorável em termos de condições de temperatura, radiação, precipitação, características do solo e relevo que coincidem com as necessidades fisiológicas da cultura (FISCHER et al., 2008), além da presença de um grande mercado consumidor interno e de usinas e indústrias do setor sucroalcooleiro próximo.

No Nordeste, a cana-de-açúcar tem sido cultivada de forma contínua e intensa ao longo do tempo nos Tabuleiros Costeiros, o que demonstra a potencialidade dos solos desse ecossistema e a adaptabilidade da cultura às características edafoclimáticas da região. Porém, a necessidade de conservação ambiental e preservação dos diversos recursos presentes nos Tabuleiros têm exigido que sua exploração fosse sustentada e com menor impacto ambiental.

No Centro-Oeste o expressivo crescimento da área plantada com a cultura da cana observado confirma a tendência da agroindústria de expandir-se nas regiões próximas às áreas tradicionalmente produtoras e que apresentem topografia e condições edafoclimáticas adequadas. Embora ainda devam ser equacionadas as carências de infra-estrutura, especialmente de transporte, essa região passa a constituir um novo e importante eixo para a agroindústria canavieira no Brasil. Nessa região, a expansão de cana-de-açúcar tem ocorrido em substituição de pastagens e, eventualmente, de campos de soja, que há algumas décadas tinham substituído o Cerrado original (NOGUEIRA et al., 2008).

Dado que a sustentabilidade do etanol brasileiro está intrinsecamente associada aos efeitos da expansão da cana-de-açúcar para novas áreas do território nacional é necessário conhecer os efeitos causados pelas mudanças do uso da terra nos agroecossistemas.

## **2.2 Mudanças de Uso da Terra**

A expansão da cultura da cana-de-açúcar para novas áreas tem demandado estudos sobre as mudanças de uso da terra. Essas alterações podem implicar em mudanças na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas, podendo afetar as taxas de adição e decomposição da

matéria orgânica do solo (MOS). A decomposição da MOS é especialmente acelerada por distúrbios físicos que destroem os macroagregados e a expõe à oxidação pela ação da biomassa microbiana do solo. Esse processo pode afetar a qualidade do solo, reduzir a produtividade das culturas em longo prazo e aumentar os riscos de erosão e perdas de solo e de emissão de CO<sub>2</sub> (PINHEIRO et al., 2007).

Mudança no uso da terra, como consequência da expansão da produção agrícola, bem como devido à competição por terras entre as atividades agrícolas, é uma questão em desenvolvimento no Brasil em termos de análise econômica e de modelagem. Com exceção da análise centrada em mudanças do uso da terra relacionadas com o desmatamento na Amazônia brasileira, que são monitoradas por órgãos governamentais e organizações ambientalistas, não há um acompanhamento regular da conversão de paisagens naturais para usos agrícolas (NASSAR et al., 2008).

As mudanças no uso e cobertura do solo, principalmente na região tropical, têm grande importância para o ciclo do C e N, pois a ciclagem da matéria orgânica do solo (MOS) é mais acelerada em ecossistemas de clima tropical do que em clima temperado (MURTY et al., 2002) e tende a diminuir com o uso agrícola (POLWSON, 2005).

As mudanças no uso da terra estão diretamente associadas a um incremento dos gases de efeito estufa, e para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> devido à mudança do uso da terra pela conversão de áreas nativas ou pastagens em agricultura, o Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) desenvolveu um procedimento analítico adotado como guia. Este procedimento está descrito no Guia para Inventários Nacionais dos Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2006). Assim, faz-se necessário estimar o estoque de carbono do solo e sua relação ao estoque de C do solo da vegetação nativa, uma vez que este é um dos parâmetros da equação de emissão de CO<sub>2</sub>, admitindo-se que a perda ou acúmulo de C no solo está associado ao potencial da cultura em suprir C através de seus resíduos e da decomposição dos mesmos em função do ambiente e manejo associado ao sistema de produção (BELIZÁRIO, 2008).

O estoque de carbono orgânico do solo é determinado, principalmente, pelas condições climáticas como temperatura e pluviosidade, espécies químicas presentes, tipos de vegetação, produtividade, tipos de solo e profundidade de raízes. Processos que reduzem o estoque de carbono incluem a degradação do solo, erosão do solo, queima de biomassa e mudanças no uso da terra e manejo adotado (BAYER et al., 2000).

Amaral et al. (2008) afirmam que um dos principais efeitos causados por mudanças no uso da terra é a variação nos estoques de carbono no âmbito de diferentes subsistemas, ou seja, no solo e na biomassa acima do solo na área. Ao analisar os efeitos ambientais causados por diferentes regimes de uso da terra, o saldo de carbono deve ser levado em conta. Assim, é necessário saber quanto de carbono seria fixado ou liberado no ar sob diferentes regimes de uso da terra em comparação com o uso anterior (AMARAL et al., 2008).

### **2.3 Estoques de Carbono e Nitrogênio do Solo**

A dinâmica dos ecossistemas terrestres depende fortemente de uma rede de interações dos organismos vivos com o meio ambiente, estabelecida com um fluxo unidirecional de energia e com a entrada de elementos e compostos inorgânicos e de seu retorno ao meio os quais se desenvolvem através de rotas complexas, mais ou menos circulares, definidas como ciclos biogeoquímicos.

Entre os diversos e complexos ciclos biogeoquímicos que compreendem a dinâmica dos ecossistemas terrestres, o ciclo do carbono tem atraído a atenção. Por ser o carbono parte essencial de todas as moléculas orgânicas, e, como constituintes da atmosfera, compostos de carbono, como o dióxido de carbono e metano, sensivelmente influenciam o clima global. O

CO<sub>2</sub> absorve radiação emitida pelo planeta e provocam o aquecimento da atmosfera, enquanto o CH<sub>4</sub>, em menores quantidades na atmosfera, tem um potencial de aquecimento 20 a 25 vezes o do CO<sub>2</sub> (FORSTER et al., 2007). Esta ligação entre o carbono da atmosfera e o clima tem atraído as atenções para discussões sobre os aspectos ecológicos do ciclo do carbono.

O ciclo do carbono, como qualquer ciclo biogeoquímico, consiste em reservatórios, fluxos e processos. Os processos, influenciados por uma série de fatores, geram os fluxos entre os reservatórios, fazendo o ciclo funcionar. O solo é um reservatório de C e o sistema de manejo um fator que influencia vários processos determinantes dos fluxos de entrada e saída de C do solo (DIEKOW et al., 2005).

O carbono está presente em quatro grandes reservatórios: hidrosfera, geosfera, atmosfera e biosfera. A hidrosfera é o maior reservatório, com 38000 Pg de C, principalmente na forma de carbonatos, seguido da geosfera, com um estoque em torno de 7500 Pg, distribuídos no solo (2500 Pg) e na litosfera (500 Pg em rochas carbonatadas e 4500 Pg em material fossilizado, como carvão e petróleo). No estoque de 2500 Pg de C no solo estão incluídos tantos os estoques de C orgânico (1550 Pg) como inorgânico (950 Pg). Os menores reservatórios são a atmosfera (760 Pg) e a biosfera com (560 Pg) (LAL, 2004; DIEKOW et al., 2004).

O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C) (MACHADO, 2005; PAUSTIAN, 2005).

O carbono orgânico do solo está presente na matéria orgânica viva, que corresponde a menos de 4% do carbono orgânico total do solo e na matéria orgânica morta, que corresponde à maior parte do carbono orgânico total do solo (96%) (MACHADO, 2005).

Considerando apenas a camada 0-30 cm de profundidade, o solo apresenta um estoque aproximado de 800 Pg de C, o que corresponde quase à mesma quantidade presente na atmosfera e na biosfera (760 Pg e 560 Pg respectivamente) (LAL, 2004; CERRI et al., 2006). Dessa forma, as mudanças nos estoques de C do solo podem contribuir para impactos significativos na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (BERNOUX et al., 2002).

A principal forma de armazenamento do carbono no solo é através da matéria orgânica e ela engloba todos os componentes orgânicos, dentre os quais: biomassa viva (tecidos animais ou vegetais intactos e microrganismos), raízes mortas e outros tecidos vegetais que ainda podem ser identificados, e uma mistura de substâncias orgânicas complexas não identificáveis como tecidos, o húmus do solo (BRADY; WEIL, 2002; SIGNOR, 2010).

A matéria orgânica exerce papel fundamental na capacidade produtiva dos solos. Ela é importante no fornecimento de nutrientes às plantas, na retenção de cátions, na complexação de elementos tóxicos, na estabilidade da estrutura do solo, na infiltração e retenção de água, na aeração e atividade biológica do solo. É considerada indicador importante da qualidade do solo, pois ela detecta alterações na qualidade em função do manejo (MIELNICZUK, 1999).

Os principais constituintes da matéria orgânica do solo são o C (52-58%), O (34-39%), H (3,3-4,8%) e N (3,7- 4,1%), sendo formada a partir da decomposição de resíduos orgânicos que são adicionados ao solo, cuja dinâmica é governada por uma série de transformações sob ação de agentes químicos, físicos e biológicos, com destaque para microbiota do solo (WEBER, 2008).

O carbono é obtido pelas plantas através da fixação fotossintética do CO<sub>2</sub> da atmosfera. O oxigênio e o hidrogênio acompanham o metabolismo do carbono e são obtidos da água também no processo fotossintético das plantas. Porém, o nitrogênio, essencial às plantas é requerido em grande quantidade pela maioria das culturas. Como não faz parte do material de origem do solo, o conteúdo de N mineral encontrado em solução é produto, ou da adição de fertilizante, ou de transformações do N orgânico em formas inorgânicas através da

mineralização da matéria orgânica. É encontrado em solução e absorvido do solo pelas plantas principalmente na forma mineral, nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) ou amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) e excepcionalmente em outras formas orgânicas com ácidos aminados e vitaminas (FAVORETTO, 2007).

Vale ressaltar o que afirmam Sisti et al. (2004) que a elevação do conteúdo de carbono do solo depende não somente do aporte de resíduos ao solo, mas que exista nitrogênio disponível no sistema para atender a demanda das culturas e um excedente para compor a matéria orgânica do solo.

O nitrogênio é um elemento mineral essencial para a vida das plantas por participar na composição da maioria dos compostos orgânicos, como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, hormônios e clorofila (MALAVOLTA, 2006). Ainda, participa das principais reações bioquímicas, do metabolismo vegetal e tem importante participação nos ciclos biogeoquímicos, que são controlados por fatores físicos, químicos, e biológicos e afetado por condições climáticas de difícil previsão e controle (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

O ingresso do nitrogênio no sistema solo-planta ocorre por diferentes vias; como por exemplo, como deposições atmosféricas através de descargas elétricas na atmosfera, fixação biológica de nitrogênio por bactérias diazotróficas de vida livre, simbióticas e associadas às espécies vegetais e através de adubação mineral ou orgânica. Por outro lado, pode ser retirado do sistema por muitas vias, que incluem a lixiviação, volatilização de amônia e desnitrificação, além da exportação pela cultura (CANTARELLA, 2007a).

Ainda, segundo Cantarella (2007b), do total de N encontrado no solo cerca de 98% está na forma orgânica, sendo componente dos restos vegetais e da matéria orgânica do solo em diferentes partículas e com variados graus de recalcitrância, ou ainda como parte de organismos vivos e os 2% restantes encontram-se em frações inorgânicas, principalmente como  $\text{NH}_4^+$  (amônio) e  $\text{NO}_3^-$  (nitrato), presentes na solução do solo e adsorvidos aos colóides minerais e em formas gasosas combinadas, tais como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}$ .

Mesmo com o elevado estoque de N orgânico no solo, ele pode não se encontrar disponibilizado para atender a demanda das plantas. Esta disponibilização é dependente da ocorrência de mineralização, ou seja, a transformação do N na forma orgânica em inorgânica ( $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$ ). E esta mineralização depende de diversos fatores os quais determinam as condições de atuação de diversos grupos de microrganismos que realizam o processo, sendo o mesmo estimado em 2 a 3% do N orgânico do solo anualmente mineralizado.

## 2.4 Emissões de Gases de Efeito Estufa

A atmosfera do planeta Terra é constituída principalmente de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ; 78,1% do volume), oxigênio ( $\text{O}_2$ ; 20,9% do volume) e argônio (Ar; 0,93%). Estes gases possuem limitada interação com a radiação emitida pelo Sol e não interagem com a radiação infravermelha emitida pela Terra. Entretanto, há uma série de gases traços como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e ozônio ( $\text{O}_3$ ) que absorvem e emitem radiação infravermelha (MACHADO, 2005).

Estes gases traços, também denominados gases de efeito estufa, ocupam menos que 0,1% do volume da atmosfera e possuem relevante papel no balanço energético da terra. A atmosfera contém também vapor d'água, aproximadamente 1% do volume, que também é um gás de efeito estufa (MACHADO, 2005).

O efeito estufa é um processo natural e essencial à vida no planeta. Os gases que estão presentes naturalmente na atmosfera, juntamente com vapor d'água permitem que a radiação solar (luz visível) atinja a superfície, porém bloqueiam parcialmente a radiação infravermelha que é emitida da superfície para atmosfera, sendo responsáveis pela manutenção de uma temperatura adequada à vida na Terra (IPCC, 2006).

As atividades humanas, principalmente aquelas envolvendo a queima de combustíveis fósseis para uso industrial e residencial e queima da biomassa (desmatamento seguido de queimadas), produzem gases de efeito estufa (GEE) que afetam a composição da atmosfera.

Embora o gás metano e o óxido nitroso apresentem potencial de aquecimento maior que o gás carbônico ( $\text{CH}_4 = 23$  vezes o  $\text{CO}_2$  e;  $\text{N}_2\text{O} = 296$  vezes o  $\text{CO}_2$ ), o  $\text{CO}_2$  é emitido em maiores quantidades devido à queima de combustíveis fósseis e desmatamento ou queimada (MACHADO, 2005).

De acordo com o quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) as emissões globais anuais de gases de efeito estufa (GEE) de caráter antrópico cresceram 70% entre 1970 e 2004. Este enriquecimento antropogênico dos GEE na atmosfera tem levado a um aumento na temperatura média da superfície terrestre de  $0,55^\circ\text{C}$  desde 1970 (IPCC, 2007).

No Brasil, ao contrário de outros países e em razão da elevada participação de energia renovável (geração de eletricidade a partir de hidrelétricas, uso de álcool no transporte e bagaço de cana-de-açúcar e carvão vegetal na indústria) na matriz energética brasileira, a maior parcela das emissões do principal gás de efeito estufa, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), é resultante da mudança do uso da terra, em particular da conversão de florestas para uso agropecuário, que responde por 75,4% das emissões totais deste gás. Ainda assim, o setor agropecuário é responsável por parcela significativa das emissões de outros dois gases de efeito estufa, o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (COSTA et al., 2008).

Dentre as diversas atividades da agricultura que contribuem direta ou indiretamente para emissão de GEE, as mais significativas estão desmatamento como fonte de dióxido de carbono, sistemas de produção de arroz (incluindo rotação de trigo) como fonte de metano e óxido nitroso (WASSMANN; VLEK, 2004).

No entanto, o efeito integrado da combinação das diferentes práticas de manejo de solo na emissão dos GEE é de difícil previsão e é altamente dependente do tipo de solo e das condições ambientais, o que determina a necessidade de realização de pesquisa em nível regional (GOMES, 2006).

Aspecto ambiental importante na cultura da cana-de-açúcar era o manejo da colheita com a queima do palhço, que ocasionava grande perda de material orgânico que poderia ser depositado na superfície do solo, contribuindo para manter os teores de matéria orgânica e assim favorecer a atividade biológica e promover a melhoria da estruturação do solo.

Vários autores ressaltaram a importância da realização da colheita da cana sem a prévia queima do palhço para as propriedades do solo e para o ecossistema como um todo (BALL-COELHO et al., 1993; BLAIR, 2000; MENDONZA et al., 2000; LIMA et al., 2002; CAMPOS, 2003; BASANTA, 2004; SOUZA et al., 2005; RAZAFIMBELO et al., 2006; SOARES et al., 2009). Além de conservar ou aumentar os níveis de matéria orgânica do solo, outras vantagens da colheita da cana sem queima são a melhoria da estrutura do solo (BLAIR, 2000), a conservação da umidade do solo (BALL-COELHO et al., 1993), a redução da erosão, a diminuição da temperatura (MENDONZA et al., 2000), a reposição de nitrogênio ao solo (BASANTA, 2004), a redução de GEE (LIMA et al., 2002; CAMPOS, 2003; BASANTA, 2004; RAZAFIMBELO et al., 2006; SOARES et al., 2009).

Segundo Soares et al. (2009) a queima da palha da cana-de-açúcar é responsável por grandes emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , que totalizam 982,3 Kg e 195,3 Kg de equivalentes de  $\text{CO}_2$ , respectivamente, para 60% da área colhida com queima, totalizando 39% de todas as emissões de GEE no processo de produção de álcool.

Vale ainda ressaltar que no crescimento da cultura há emissões significativas de  $\text{N}_2\text{O}$  devido às aplicações de N como fertilizante ou de fontes orgânicas (vinhaça e torta de filtro), constituindo 80% das emissões totais em equivalentes de  $\text{CO}_2$  nesta fase (SOARES et al., 2009).

As emissões de  $N_2O$  do solo são causadas principalmente por processos microbianos de nitrificação e desnitrificação. Apesar da possível produção de  $N_2O$  por nitrificação, os maiores picos de emissão de  $N_2O$  em solos geralmente são atribuídos aos processos de desnitrificação (LEE et al., 2006; LIU et al., 2007), contribuindo com cerca de 70% das emissões deste gás para a atmosfera (MOISER, 2004).

Estes processos são controlados por vários fatores, destacando-se o espaço poroso saturado por água, temperatura e a concentração de N mineral ( $NH_4^+$  e  $NO_3^-$ ) (DAVIDSON, 1993). Assim, devido à grande diversidade de bactérias no solo capazes de desnitrificar, sendo em sua maioria microrganismos anaeróbios facultativos que oxidam formas orgânicas de carbono disponível no solo, usando o  $NO_3^-$  como receptor final de elétrons na ausência de  $O_2$  (PAUL; CLARCK, 1996).

Práticas de manejo que aumentem a quantidade de N mineral no solo criando condições favoráveis à desnitrificação podem aumentar as emissões de  $N_2O$ . Considerando diferentes sistemas agrícolas com utilização de grandes quantidades de fertilizantes nitrogenados, estes em geral tornam-se emissores potenciais de  $N_2O$  para a atmosfera (GRANLI; BOCKMAN, 1994).

A maior emissão deste gás é relacionada às condições de anaerobiose, favoráveis ao processo de desnitrificação (SMITH; CONEN, 2004). A anaerobiose em solos não revolvidos pode estar relacionada à menor porosidade de aeração associada ao maior teor de água no solo, o que resulta em menor difusão de  $O_2$ . Entretanto, as interações entre os fatores e magnitude deste processo devem ser dependentes do tempo de manejo. Possivelmente, a adição de C orgânico solúvel e de resíduos vegetais de fácil decomposição pode contribuir para a falta de  $O_2$  no solo, o qual é consumido no processo de decomposição aeróbica destes compostos orgânicos (SMITH et al., 2003).

## 2.5 Volatilização de $NH_3$ na Cultura da Cana-de-açúcar

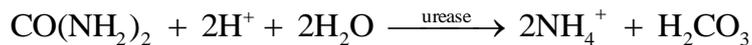
O processo de volatilização de N- $NH_3$  refere-se à mineralização da matéria orgânica e dos fertilizantes minerais e suas transformações na forma de amônia gasosa do solo para atmosfera, sendo este processo determinado pelo equilíbrio de concentrações.

Inicialmente o processo de volatilização envolve a hidrólise de fonte nitrogenada por meio da urease. A urease é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo ou ainda originada de restos vegetais. Como resultado da hidrólise, tem-se a formação de carbonato de amônia e, por causa das características da urease, fatores que influenciam a atividade dos microrganismos também influenciam a hidrólise da ureia promovendo grande variação na taxa de hidrólise para diferentes classes de solo (REYNOLDS et al., 1987).

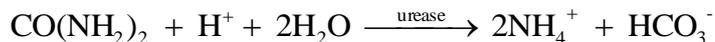
A volatilização de  $NH_3$  do solo está diretamente relacionada aos fatores climáticos, fontes e doses de nitrogênio utilizadas e tipos de solo. Entre os fatores climáticos, a temperatura e a precipitação pluviométrica são os que exercem maior influência nos processos de perda, embora outros fatores como incidência e velocidades do vento também contribuam (MARTHA Jr., 2003). Além desses outros como trocas gasosas, evaporação da água, o conteúdo de água no solo, o pH, o poder tampão do solo, a capacidade de troca de catiônica também favorecem as perdas (FRENEY, 1985; HARGROVE, 1988).

Na adubação nitrogenada da cana-de-açúcar, a ureia é a fonte de N mais utilizada e, quando aplicada sobre a palha, apresenta elevadas taxas de perda de N- $NH_3$  por volatilização (COSTA et al., 2003).

Quando aplicada ao solo, a ureia sofre hidrólise enzimática liberando N amoniacal. Em solos com pH menor que 6,3 - maioria dos casos do solos brasileiros - a reação predominante é (CANTARELLA, 2006).



Em solos com pH mais elevado ( $\geq 6,3$ ) a reação é:



A reação de hidrólise consome prótons ( $\text{H}^+$ ) e provoca a elevação do pH ao redor das partículas, assim, mesmo em solos ácidos, a ureia está sujeita a perda de N por volatilização de  $\text{NH}_3$  (CANTARELLA, 2006).

Essa reação provoca elevação temporal do pH ao redor das partículas (OVERREIN; MOE, 1967), o que modifica o equilíbrio entre  $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$  no solo ( $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ); quanto maior o valor do pH alcançado na zona de aplicação, menor é a proporção de N- $\text{NH}_4^+$  e maior é o potencial de volatilização de  $\text{NH}_3$  (KISSEL et al., 1988).

A conversão do sistema de preparo convencional para o sistema de plantio direto ocasiona modificações em longo prazo nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (ROJAS et al., 2012). O uso do sistema de plantio direto promove aumento da matéria orgânica do solo e da biomassa microbiana (BAYER et al., 2000; VARGAS et al., 2000), principalmente na camada superficial, o que pode condicionar a atividade da urease em relação ao solo em plantio convencional, potencializando o processo de volatilização da amônia. De outro modo, o maior estoque de matéria orgânica em superfície aumentaria a adsorção de N- $\text{NH}_4^+$  e a capacidade de tampão do solo, limitando o processo de volatilização neste sistema (ROJAS et al., 2012).

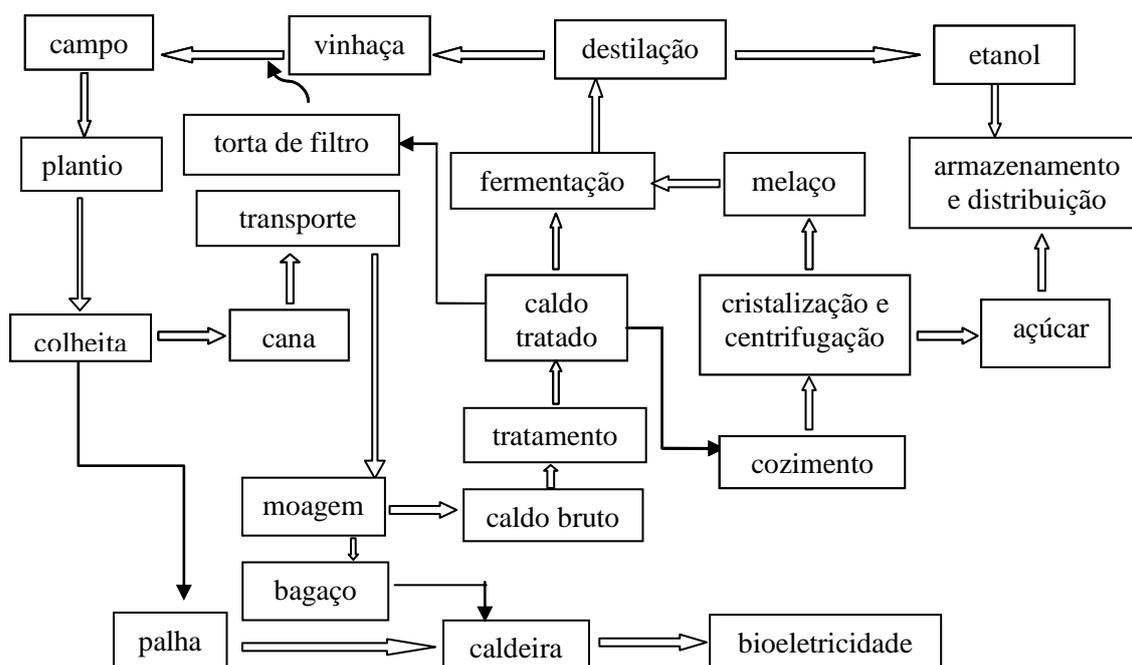
De acordo com Rojas et al. (2012) os resíduos culturais de diferentes plantas de cobertura também podem modificar a temperatura, a umidade, o processo de evaporação e a atividade da urease na camada superficial do solo. A maior taxa de decomposição de leguminosas pode aumentar a atividade da urease em comparação a gramíneas e a diferente permanência da camada de resíduo também pode alterar o contato dos grânulos da ureia com o solo, o que limita sua difusão no solo (RODRIGUES; KIEHL 1986), influenciando a magnitude do processo de volatilização (LARA-CABEZAS et al., 1997)

A magnitude das perdas de amônia por volatilização em função da presença dos resíduos culturais é difícil de prever. Se, por um lado, eles podem aumentar a concentração e a atividade da urease, o que elevaria a volatilização de amônia, por outro lado, os resíduos culturais, na superfície do solo diminuem a temperatura e a perda de umidade por evaporação, além de aumentar a CTC do solo o que poderia diminuir a volatilização de amônia (ROS et al., 2005).

## 2.6 Vinhaça e Fertilizantes Empregados na Cultura da Cana-de-açúcar

A vinhaça é o principal subproduto da agroindústria canavieira e que se apresenta em grande volume, dificultando seu transporte e eliminação. É um produto resultante da destilação e fermentação da cana-de-açúcar no processo de fabricação do álcool, e também pode originar-se como subproduto da produção de açúcar sendo eliminada no processo de cristalização do caldo da cana (Figura 1).

A vinhaça é frequentemente aplicada nas áreas canavieiras como meio para correção do solo, principalmente para potássio, o qual é encontrado em maior concentração, além da riqueza de matéria orgânica e água presentes e que são utilizados com grande vantagem econômica (LEITE, 1999).



**Figura 1.** Fluxograma simplificado da produção de açúcar e álcool e dos produtos oriundos da dessa produção (Adaptado da UNICA, 2011).

Na lavoura, normalmente, a vinhaça é conduzida utilizando canais sem revestimento para conduzir o líquido em pontos convenientes, onde através do método de aspersão do tipo montagem direta, é aplicada nos canaviais. Em geral as destilarias dispõem de canal principal ou mestre, de onde o líquido é distribuído a outros canais, denominados secundários, a partir dos quais é aplicado por aspersão.

Ao longo do tempo, muitos estudos sobre os efeitos da vinhaça no solo concluíram que: a vinhaça eleva o pH dos solos, aumenta a CTC, fornece e aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes, melhora a estrutura do solo, aumenta a retenção de água e melhora a atividade biológica. A ocorrência de eventuais efeitos negativos causados aos solos e as plantas estão relacionados, geralmente, a doses excessivas (IVO et al.; 2008).

Dados sobre a emissão de CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub>O da vinhaça são escassos. As doses de vinhaça variam de 80 a 150 m<sup>3</sup> por ha<sup>-1</sup>, podendo chegar a 200 m<sup>3</sup>, que carregam consigo significativa quantidade de material orgânico e nutriente. Resende et al. (2006) calcularam que em 80 m<sup>3</sup> de vinhaça continham 93 kg de K, 35 kg de S, 23 kg de N, e 8 kg de P. Como a vinhaça frequentemente contém ao redor de 1 a 2 % de carbono solúvel e a água da lavagem da cana também é contaminada com algum açúcar, isto poderia resultar em emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Toda a vinhaça produzida na usina é distribuída nas lavouras de cana-de-açúcar por fertirrigação, chegando até os locais de aplicação por canais abertos. A temperatura da vinhaça recém-produzida se aproxima dos 100 °C e vai esfriando-se no canal de distribuição.

Estudos evidenciam a falta ou limitada disponibilidade de fatores de emissão de gases estufa pela agropecuária brasileira (JANTALIA et al., 2006), decorrentes da carência de estudos sobre o assunto no País. No que se refere ao período que vai do plantio a colheita da cultura de cana-de-açúcar, são necessários mais dados sobre as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> originadas da aplicação de fertilizantes e, principalmente, de resíduos orgânicos, derivados dos subprodutos como a vinhaça aplicada com frequência nesta cultura.

**3 CAPÍTULO I – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM  
LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CANA-DE-  
AÇÚCAR, NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO PRETO-SP**

### 3.1 RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar destaca-se como fonte geradora de bioenergia, utilizada em substituição aos combustíveis fósseis. A expansão da cultura para novas áreas tem demandado estudos sobre os impactos nos estoques de C e N do solo. Assim, objetivou-se avaliar o efeito do tempo de manejo da cana-de-açúcar sobre os estoques de C e N do solo, avaliado em uma cronosequência de cultivo de cana-de-açúcar, renovada em sistema convencional sem queima, implantado em área anteriormente ocupada com pastagens. O estudo foi realizado em uma área de LATOSSOLO VERMELHO eutroférico (LVef), textura argilosa, no Município de Ribeirão Preto-SP. Foram consideradas duas áreas de cana-de-açúcar, uma com mais de 25 anos e outra com 3 anos de cultivo respectivamente, uma área ocupada com pastagem e outra com floresta secundária com mais de 30 anos. O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado com 4 tratamentos e 4 repetições. Os estoques de C e N foram estimados para as camadas de 0-30 cm e de 0-100 cm. Não houve diferença estatística para a profundidade 0-30 cm corrigido para massa igual de terra entre a floresta, pastagem e cana 3 anos, que somaram, respectivamente, 55,05, 48,85 e 49,96 Mg C ha<sup>-1</sup> e 4,27, 3,74 e 3,83 Mg N ha<sup>-1</sup>. A área sob cana > 25 anos para esse intervalo de profundidade apresentou estatisticamente menores valores dos estoques de C (46,04 Mg C ha<sup>-1</sup>) e N (3,45 Mg N ha<sup>-1</sup>) em relação a floresta secundária, porém esses valores não diferiram dos outros dois sistemas de uso do solo. Na camada 0-100 cm a floresta apresentou valor significativamente maior (118,36 Mg C ha<sup>-1</sup>) do que as áreas de cana > 25 anos (103,25 Mg C ha<sup>-1</sup>) e a pastagem (102,29 Mg C ha<sup>-1</sup>). A área de cana com 3 anos apresentou estoque de C (109,97 Mg C ha<sup>-1</sup>) que não diferiu entre os três outros sistemas. A floresta e a cana com 3 anos apresentaram maiores estoques de N, respectivamente (8,52 e 8,02 Mg N ha<sup>-1</sup>), comparada com a área de cana > 25 anos (7,04 Mg N ha<sup>-1</sup>), mas não diferente da área de pastagem (7,79 Mg N ha<sup>-1</sup>), a qual não diferenciou da área de cana > 25 anos. Os resultados sugerem que o plantio da cana-de-açúcar em áreas de pastagens de baixa produção não modificam significativamente os estoques de C e N do solo, mas chegam a níveis inferiores aos da floresta secundária (> 30 anos).

### 3.2 ABSTRACT

The cultivation of sugarcane stands out as a source of bioenergy used to replace fossil fuels. The expansion of cultivation to new areas has required studies on the impacts on soil C and N stocks. Hence, the present study aimed to evaluate the changes in the soil stocks of C and N under non-burnt sugarcane grown in an area previously with pasture. The study was conducted in an area of a clayey Oxisol (LVef) in Ribeirão Preto-SP. For the evaluation of C and N it was considered a chronosequence of two sugarcane areas, with 3 and 25 years of cultivation, and areas with pasture and over 30 years secondary forest. The stocks of C and N were estimated for the 0-30 cm and 0-100 cm layers. There was no statistical difference for the depth 0-30 cm, after correction for soil equal mass between forest, pasture and sugarcane of 3 years, which amounted to, respectively, 55.05, 48.85 and 49.96 Mg C ha<sup>-1</sup> and 4.27, 3.74 and 3.83 Mg N ha<sup>-1</sup>. The area under the > 25 years sugarcane, for this depth range, showed statistically lower values of C stocks (46.04 Mg C ha<sup>-1</sup>) and N (3.45 Mg N ha<sup>-1</sup>) compared to secondary forest; but these values did not differ from the other two systems of land use. In the 0-100 cm layer, the forest showed a value significantly higher (118.36 Mg C ha<sup>-1</sup>) than the > 25 years sugarcane (103.25 Mg C ha<sup>-1</sup>) and the pasture (102.29 Mg C ha<sup>-1</sup>). The C stock (109.97 Mg C ha<sup>-1</sup>) in the 3 years sugarcane did not differ from the other systems. The forest and the 3 years sugarcane had higher N stock, respectively 8.52 and 8.02 Mg N ha<sup>-1</sup>, when compared with the sugarcane > 25 years (7.04 Mg N ha<sup>-1</sup>), but they were not different from the pasture (7.79 Mg N ha<sup>-1</sup>), which was not different from the > 25 years sugarcane. The results suggest that planting sugarcane in pastures of low production does not significantly modify the stocks of soil C and N, but even below the levels of secondary forest (> 30 years).

### 3.3 INTRODUÇÃO

Entre os diversos recursos presentes nos agroecossistemas, o solo é um componente importante e o seu uso e manejo são fundamentais na busca de uma atividade agrícola sustentável. Nesse contexto, a recomendação de sistemas de manejo mais adequados para a conservação das propriedades do solo, especialmente de seu conteúdo de matéria orgânica (reserva de C e N), assume papel importante na definição das práticas agrícolas que melhor se adaptam à cultura da cana-de-açúcar para a região em que ela esta inserida.

No Brasil o cultivo de cana-de-açúcar se estabeleceu sobre as mais diferentes classes de solos do território nacional, desde Neossolos Quartzarênicos a Latossolos, sendo estes últimos, juntamente com os Argissolos, os mais representativos (SILVA; RIBEIRO, 1997). Estas classes de solos estão sob a influência de diferentes climas, o que resulta em uma diversidade de ambientes para a produção desta cultura (MAULE et al., 2001).

A expansão da cultura para novas áreas no país têm demandado estudos sobre o impacto no uso da terra e avaliação dos estoques de C e N do solo, uma vez que a cana-de-açúcar é matéria prima de biocombustível, e sua utilização requer que os potenciais impactos ambientais sejam avaliados. E entre estes se destacam a decomposição e as perdas da matéria orgânica, além das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os solos são ecossistemas frágeis e quando manejados inadequadamente podem significar fonte de CO<sub>2</sub> para atmosfera (CERRI et al., 2006). No caso específico do C do solo, espera-se que um equilíbrio entre a deposição de matéria orgânica e sua decomposição seja atingido para cada cobertura vegetal, cuja magnitude é influenciada pela textura do solo, clima, e produção primária da vegetação (JOHNSTON et al., 2009).

Geralmente, mudanças nos estoques de C induzida pelo manejo se manifestam ao longo de um período de vários anos a algumas décadas, até que os estoques de C no solo se aproximar de um novo equilíbrio (IPCC, 2006).

De acordo com Sisti et al. (2004), o estoque de C no perfil do solo depende não somente do aporte de resíduos ao solo, mas que exista N disponível no sistema para atender a demanda das culturas, e um excedente para compor a matéria orgânica do solo. Por isso, espera-se que se o manejo dos sistemas agrícolas for eficiente na produção de resíduos e em pelo menos garantir a reposição do N que é exportado do sistema (colheita e perdas), influencie os estoques de C do solo de forma significativa.

Assim, a utilização de culturas perenes ou semiperenes, como a cana-de-açúcar, pode ser uma estratégia de importância para a conservação do solo, já que o preparo do mesmo é realizado com menor frequência que para culturas de ciclo anual, a produção de resíduos no sistema de colheita sem a queima é abundante, alcançando até 25 Mg de matéria seca anualmente, considerando-se a palha e as raízes (SOARES et al., 2009), e a oferta de N parece ser suficiente em função da fertilização nitrogenada e da elevada contribuição da fixação biológica de N<sub>2</sub> associada à cultura (URQUIAGA et al., 2012).

Nos ecossistemas naturais a fonte de carbono orgânico do solo tem uma única origem, ou seja, os resíduos da vegetação nativa, enquanto nos agroecossistemas, a maior parte do carbono do solo apresenta no mínimo duas fontes: a remanescente da vegetação nativa e a produzida pela decomposição dos resíduos vegetais de uma ou mais culturas introduzidas (BERNOUX et al., 1999). Em diversos estudos têm sido sinalizado que a manutenção da palhada no solo altera as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Em diversos experimentos, uma correlação entre a manutenção da palhada da cana-de-açúcar e o aumento dos teores de C total do solo tem sido observada, com influencia de variáveis como tempo de adoção do sistema sem queima, grau de revolvimento do solo na reforma do canavial, textura

e mineralogia do solo e o clima, principalmente temperatura e precipitação (CANELLAS et al., 2003; CERRI et al., 2004; PINHEIRO et al., 2007; BELIZÁRIO, 2008; GALDOS et al., 2009).

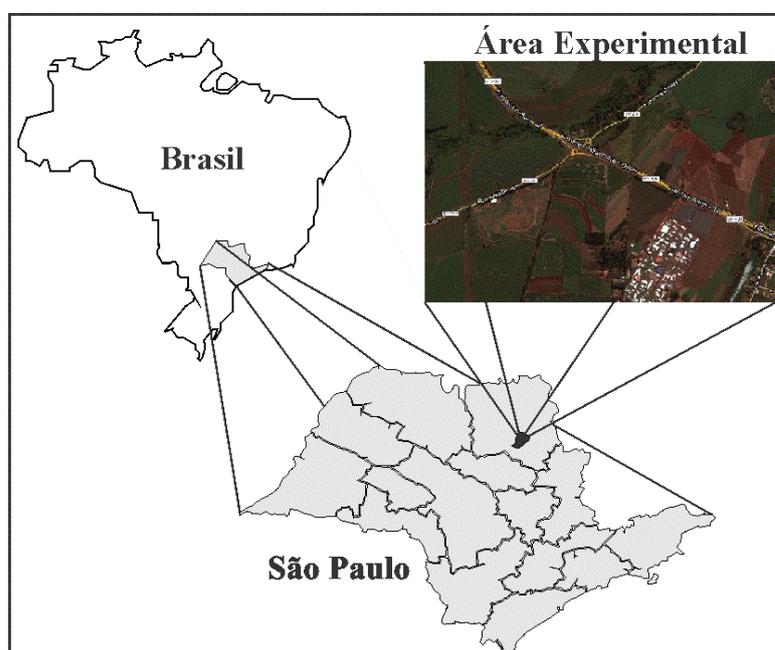
Apesar das características do sistema de produção sem a queima da palhada ser promissor no que se refere à manutenção dos estoques de C do solo, é importante avaliar o impacto da cultura quando em substituição às pastagens ou sistemas anuais, e o quanto o estoque de C conseguido após o novo equilíbrio se distancia do que seria observado na vegetação nativa local, sendo essa análise a base metodológica do IPCC (1996; 2006) para avaliação do uso e mudança de uso da terra (LULUCF).

Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo quantificar os estoques de C e N do solo em uma cronossequência de cultivo de cana-de-açúcar, renovada em sistema convencional sem queima, implantado em área anteriormente ocupada com pastagem.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Condições experimentais

A área de estudo pertence à Estação Experimental do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) – Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto no Estado de São Paulo (24°10'40" S e 47°48'36" W). O clima da região é do tipo tropical Aw, segundo a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual de 1422,5 mm, com temperatura máxima de 31 °C e mínima de 13 °C, e altitude de 546 m. A classe de solo é LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), textura argilosa (Figura 2) (OLIVEIRA; MONIZ, 1975; EMBRAPA, 2006).



**Figura 2.** Mapa do Brasil com destaque para Estado de São Paulo e imagem aérea IAC-APTA Ribeirão Preto-SP (Foto aérea Google Earth em 25-01-2012).

A área agrícola de Ribeirão Preto está situada, predominantemente, em Latossolos de origem basáltica, utilizados para o cultivo de cana, pastagens, citros e culturas anuais. Durante os anos 1880-1950 a cultura do café dominava a maior parte do Leste do Estado de São Paulo, onde está situado Ribeirão Preto, mas o declínio gradual da participação do Brasil no mercado internacional provocou a substituição de uma grande de área de café por outras culturas (ELIAS, 1997). A Estação Experimental foi criada em uma fazenda de café desapropriada em 1934, que foi parcialmente utilizado para experimentos com culturas alternativas, como o algodão, soja, entre outras, sendo a restante área mantida com café, ou utilizada para criação de gado. Oliveira e Moniz (1975) relataram que a partir dos anos 1960 a maior parte da região de Ribeirão Preto era desprovida da vegetação nativa original.

#### 3.4.2 Quantificação dos estoques de C e N do solo

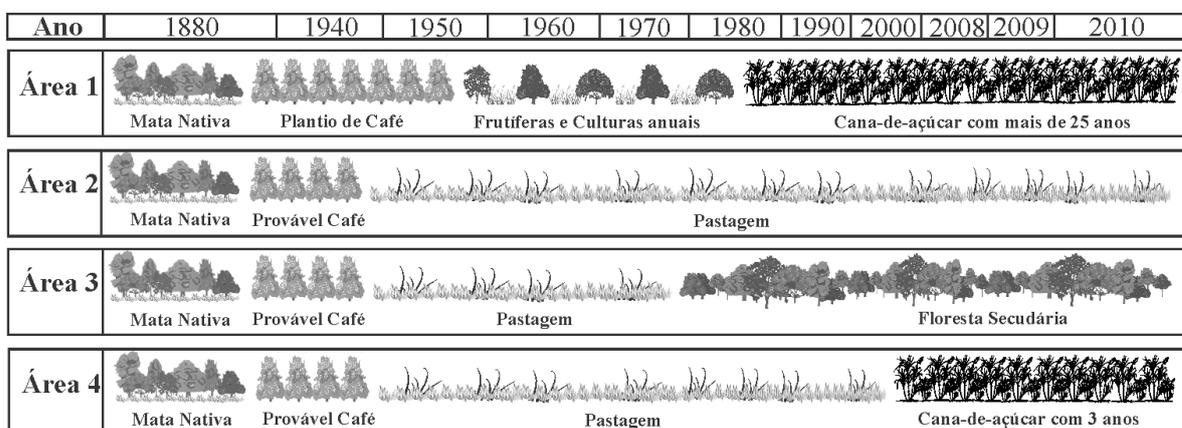
##### a) Seleção dos sítios

Para realização do estudo quatro áreas foram selecionadas: duas áreas de cana-de-açúcar foram escolhidas, ambas sempre colhidas sem queima e com manutenção da palhada

no campo. A primeira estabelecida entre 1980 e 1985, chamada cana > 25 anos, após vários anos de cultivo de espécies anuais que substituíram antigas plantações de café e atualmente cultivada com a variedade IACSP 95-5000 que estava no 3º corte (soqueira 2), durante a fase de plantio nesta área o preparo do solo ocorre de modo convencional, ou seja, com operações que envolvem subsolagem, aração e gradagem do solo. A segunda área com cana-de-açúcar, chamada de cana 3 anos, foi criada em 2008 substituindo parte de uma antiga pastagem com *Brachiaria* SP e atualmente cultivada com a variedade IACSP 95-5000 que estava no 2º corte (soqueira 1), e onde o preparo do solo ocorre em sistema de plantio direto, ou seja, a palha e os restos vegetais são deixados na superfície do solo e o mesmo é revolvido apenas no sulco de plantio.

Os rendimentos para as duas áreas cultivadas com cana-de-açúcar foram muito semelhantes, aproximadamente 82 Mg.ha<sup>-1</sup>, e a quantidade de resíduo remanescente no campo foi de 25,2 ± 0,9 Mg.ha<sup>-1</sup>, de matéria seca.

A área de pastagem restante foi também amostrada. E por fim, uma área de vegetação secundária de mais de 30 anos de idade, plantada com espécies nativas, em parte da área do mesmo pasto localizado a cerca de 200 m da área mais nova de cana (Figura 3).



**Figura 3.** Histórico de mudança do uso da terra referente às áreas: Área 1: Cana-de-açúcar > 25 anos, Área 2: Pastagem, Área 3: Floresta secundária e Área 4: Cana-de-açúcar de 3 anos

### b) Coleta e preparo das amostras de terra

Previamente à coleta foram demarcadas três áreas de 10 x 10 m em cada um dos sítios, as quais foram utilizadas como repetições. E em cada área foi aberta uma trincheira e coletadas amostras de solo das seguintes camadas de profundidades de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm.

Em cada trincheira foram amostradas duas paredes opostas, e em cada parede foram realizadas três repetições de amostragens em cada uma das camadas de profundidades. Nestas camadas foram retiradas amostras indeformadas, camada a camada, com anel de Kopeck para determinar a densidade do solo. Nas duas áreas cultivadas com cana-de-açúcar as paredes das trincheiras amostradas corresponderam a face transversal a linha de cultivo.

A partir das amostras indeformadas levadas ao laboratório, uma alíquota foi retirada para determinação da massa seca total contida no volume do anel de Kopeck. A outra parte restante das amostras foram secas ao ar e peneiradas a 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### 3.4.3 Análises realizadas

#### a) Densidade do solo

O anel de Kopeck usado na coleta de amostras indeformadas apresentava volume interno de 83 cm<sup>3</sup>. As amostragens em cada camada foram realizadas cuidadosamente inserindo o anel com o mínimo de compactação. Após a retirada do excesso de solo externo aos anéis, o conteúdo do anel foi transferido para um saco plástico. No laboratório, as amostras foram colocadas para secar em estufa a 105 °C, por 48 horas, para determinação do peso seco da amostra. Assim, através da razão entre a massa de solo seco e o volume do anel, calculou-se a densidade do solo (DS) de cada profundidade.

#### b) Textura do solo

Para determinação da textura do solo foram coletadas amostras deformadas de cada camada, sendo realizadas seis repetições por camada. A textura do solo (% argila, silte e areia) foi determinada por dispersão de argila, em uma solução de NaOH 0,3 molc L<sup>-1</sup> usando o método de pipeta (GEE; BAUDER, 1986).

Houve a necessidade de remoção dos óxidos de ferro e alumínio mal cristalizados, realizando-se um pré-tratamento com 10 mL de HCl 0,25 molc L<sup>-1</sup> e 15 mL de água deionizada, seguindo a dispersão com o 25 mL NaOH 0,3 molc L<sup>-1</sup>.

#### c) Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$

A análise da abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  foi realizada de forma simultânea à de carbono e nitrogênio total, utilizando um espectrômetro de massa de razão isotópica (espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus – Finnigan MAT, Bremen, Alemanha), que utilizou o CO<sub>2</sub> gerado das amostras via oxidação seca pelo auto-analisador de carbono e nitrogênio acoplado (Modelo Elementar Combustion System CHNS-O, Costech Analytical Technologies Inc., Valencia, USA), existente no Laboratório John M. Day da Embrapa Agrobiologia.

#### d) Carbono e nitrogênio total do solo

O teor do carbono e nitrogênio total das amostras de terra foi determinado pelo método de combustão a seco. Em função do teor de carbono, utilizou-se aproximadamente 30 mg da amostra de solo coletada em cada camada de profundidade, acondicionados em cápsulas de estanho, para análise em um auto-analisador de carbono e nitrogênio (Modelo Elementar Combustion System CHNS-O, Costech Analytical Technologies Inc., Valencia, USA). Amostra e cápsula reagiram com o oxigênio a uma temperatura de 1700 a 1800 °C; a amostra foi decomposta em N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e SO<sub>4</sub>. Em seguida, os gases passam por uma coluna de separação de cromatografia gasosa. À medida que passam pela coluna, são separados e detectados através de sinais proporcionais à concentração do elemento na amostra pelo TCD (Thermal Conductivity Detector). Um software acoplado ao sistema compara o pico de leitura do elemento conhecido com o do material padrão utilizado na calibração do aparelho. Um relatório é gerado para cada elemento na base de peso da amostra. O aparelho foi calibrado a cada 5 amostras com amostras-padrão do laboratório.

#### e) Cálculo dos estoques de carbono e nitrogênio do solo

Em todo sistema agrícola, a movimentação do solo e o tráfego de máquinas nas etapas de preparo do solo, tratos culturais e/ou colheita, causam compactação das camadas mais superficiais. Assim, seguindo recomendação de diversos autores (VELDKAMP, 1994; NEILL, 1997; SISTI et al., 2004) para comparar estoques de nutrientes no solo sob sistemas agrícolas e/ou vegetação natural, as camadas de solo a serem comparadas devem possuir a

mesma massa do solo do tratamento empregado como referência. O processo de ajuste da massa de solo foi realizado camada a camada, conforme a diferença entre as densidades do solo de cada uma.

O estoque de carbono foi calculado utilizando a seguinte equação (SISTI et al., 2004):

$$C_S = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[ M_{Tn} - \left( \sum_{i=1}^n M_{Ti} - \sum_{i=1}^n M_{Si} \right) \right] C_{Tn} \quad \text{.....equação 1.}$$

Em que,

$C_S$  é o estoque total em Mg C ha<sup>-1</sup>,

$\sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti}$  é a soma do carbono da primeira (superfície) a última camada no perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>),

$\sum_{i=1}^n M_{Ti}$  é a soma da massa do solo da primeira a última camada no perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>),

$\sum_{i=1}^n M_{Si}$  é a soma da massa do solo da primeira a última camada no perfil do solo no tratamento referência (Mg ha<sup>-1</sup>),

$M_{Tn}$  é a massa do solo na última camada do perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>), e

$C_{Tn}$  é a concentração de carbono na última camada do perfil do tratamento avaliado (Mg C Mg<sup>-1</sup> de solo).

#### 3.4.4. Análise estatística

Dados para os atributos do solo foram comparados assumindo uma casualização inteira das parcelas. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa estatístico R versão 2.15.2 livre e Sisvar (Versão 5.1 – Build 73, 1999 – 2007, UFLA). Para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias dos erros foram aplicados os testes de Lilliefors e de Cochran & Bartley, respectivamente, contidos no programa estatístico R 2.15.2.

Com os programas utilizados foram realizadas a análise de variância e a comparação de médias dos diferentes atributos avaliados. A análise de comparação de medias foi realizada por meio do teste de Tukey com nível de significância de  $p \geq 0,05$ .

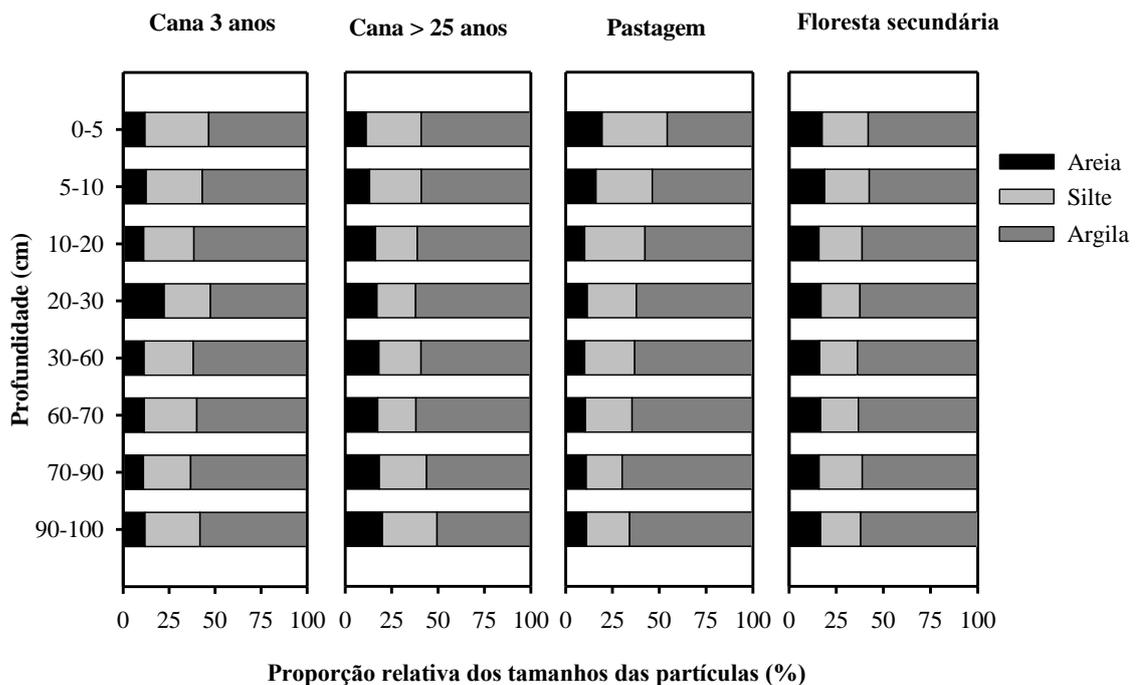
### 3.5. RESULTADOS

Um critério importante nos estudos sobre mudança de uso da terra e as conseqüentes alterações nos estoques de C e N do solo é a homogeneidade das áreas na sua origem e que possibilite avaliar os efeitos causados pela mudança e pelas diferentes formas de uso e sistemas de manejo aplicados nas áreas ao longo do tempo.

Uma estratégia importante e complementar as avaliações da dinâmica dos estoques de C e N ao longo do tempo compreende a investigação de áreas em cronossequência de uso e que consiste de áreas sob as mesmas condições de solo, clima e topografia, variando o tempo de cultivo sob um mesmo sistema de manejo (GALDOS, 2007).

Dessa forma, a investigação preliminar dos parâmetros como textura, densidade e abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  do solo permitem comprovar a similaridade entre as áreas e a possibilidade de comparação entre as mesmas.

As quatro áreas apresentaram textura do solo em proporções semelhantes argila, silte e areia para todo o perfil do solo (Figura 4). O conteúdo de argila variou de 59 a 62%, enquanto argila + silte estava na faixa de 80 a 89%.



**Figura 4.** Textura do solo para diferentes camadas em área de Cana-de-açúcar 3 anos, Cana-de-açúcar com mais de 25 anos, Pastagem e Floresta secundária em Ribeirão Preto SP.

A densidade do solo variou de 1,13 a 1,29  $\text{kg dm}^{-3}$  na camada mais superficial, dependendo do uso do solo. Na área de floresta secundária a densidade na camada superior foi a menor 1,13  $\text{kg dm}^{-3}$ , porém não diferiu estatisticamente das áreas de pastagem e de cana >25 anos. Os valores da densidade para camada superior para as áreas de cana > 25 anos e cana 3 anos não foram observado diferenças significativas. A cana com 3 anos apresentou o maior valor de densidade do solo 1,29  $\text{kg dm}^{-3}$  na camada mais superficial (Tabela 01). Para camada abaixo da superficial, sujeito a perturbações físicas (aração, pisoteio, tráfego de máquinas, entre outros), diferenças significativas foram observadas até a camada 30 cm de profundidade, e abaixo dessa camada apenas na camada 80 cm foi observada a diferença entre as áreas, em

que a cana > 25 apresentou maior densidade que a área da floresta secundária, mas não diferenciando das outras áreas.

**Tabela 1.** Densidade do solo para os diferentes intervalos de profundidade das áreas amostradas sob floresta secundária, pastagem, cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo e cana-de-açúcar com >25 anos de cultivo em Ribeirão Preto-SP.

Profundidade cm	Floresta	Pastagem	Cana 3 anos	Cana > 25 anos	DMS	CV
	Kg dm <sup>-3</sup>					%
00 - 05	1,13b	1,13b	1,29a	1,23ab	0,13	12,07
05 - 10	1,24ab	1,31a	1,22b	1,26ab	0,09	8,14
10 - 15	1,19b	1,30a	1,26ab	1,18b	0,09	9,04
15 - 20	1,21a	1,24a	1,22a	1,26a	0,07	6,98
20 - 30	1,18b	1,23ab	1,22ab	1,26a	0,08	7,63
30 - 40	1,17a	1,22a	1,18a	1,21a	0,1	9,6
40 - 50	1,09a	1,13a	1,17a	1,15a	0,09	9,57
50 - 60	1,11a	1,07a	1,15a	1,15a	0,09	9,77
60 - 70	1,10a	1,09a	1,11a	1,13a	0,07	8,03
70 - 80	1,04b	1,07ab	1,10ab	1,12a	0,07	8,29
80 - 90	1,02a	1,02a	1,05a	1,09a	0,12	13,41
90 - 100	1,04a	1,04a	1,03a	1,09a	0,05	6,25

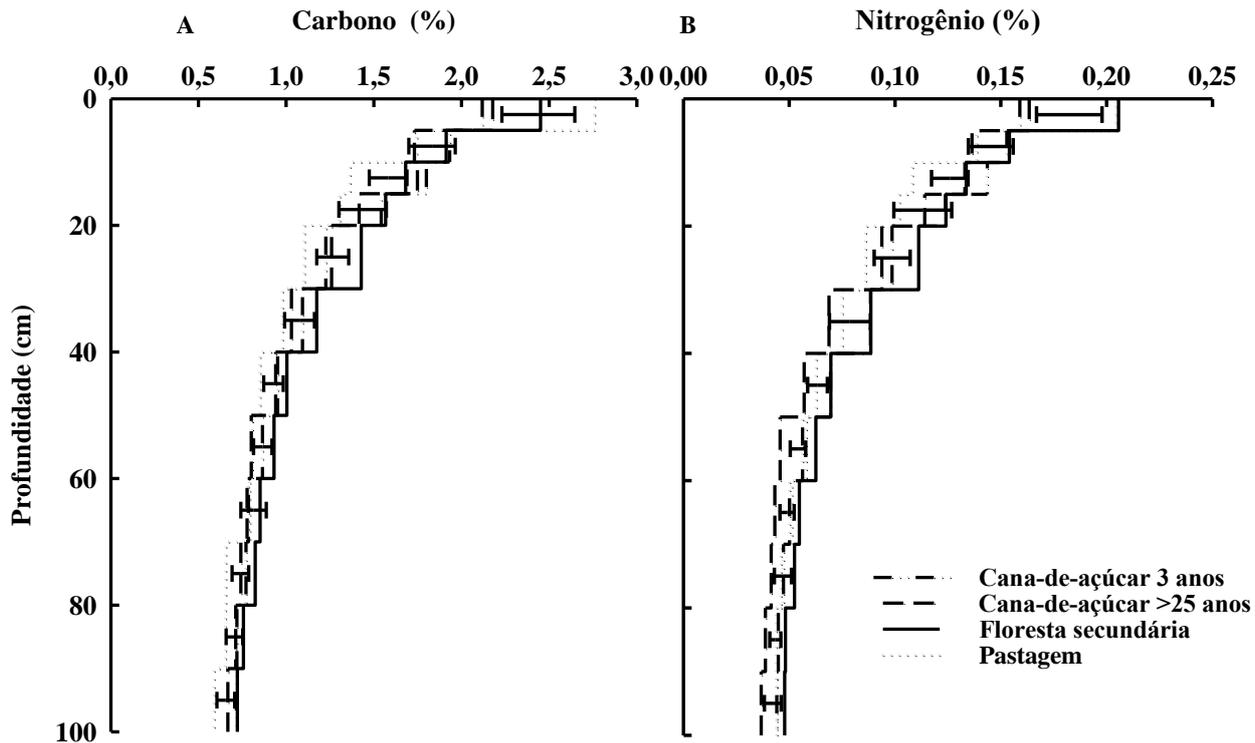
Mesmas letras na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey;  $p \geq 0,05$ .

O conteúdo total de C e N do solo diminuiu com a profundidade e diferenças significativas entre os usos do solo foram observados (Figura 5A e 5B). Na camada superficial 0-5 cm a área de pastagem apresentou teor de C consistentemente mais elevado que as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos e > 25 anos de cultivos, porém não diferenciou estatisticamente da área de floresta secundária, a qual apresentou valor que não diferenciou das áreas de cultivo de cana-de-açúcar.

Nas camadas subsuperficiais a área de floresta secundária apresentou teores de C significativamente mais elevado que a área de pastagem, exceto nas camadas (5-10, 15-20 e 60-70), em que os valores foram semelhantes. Os teores de C da área de floresta secundária não diferenciaram das áreas de cana-de-açúcar de 3 anos e > 25 anos de cultivos, exceto para camada de 50-60 cm para cana cultivada a 3 anos e para camada de 20-30 cm para cana > 25 anos em que os valores foram semelhantes ao da pastagem.

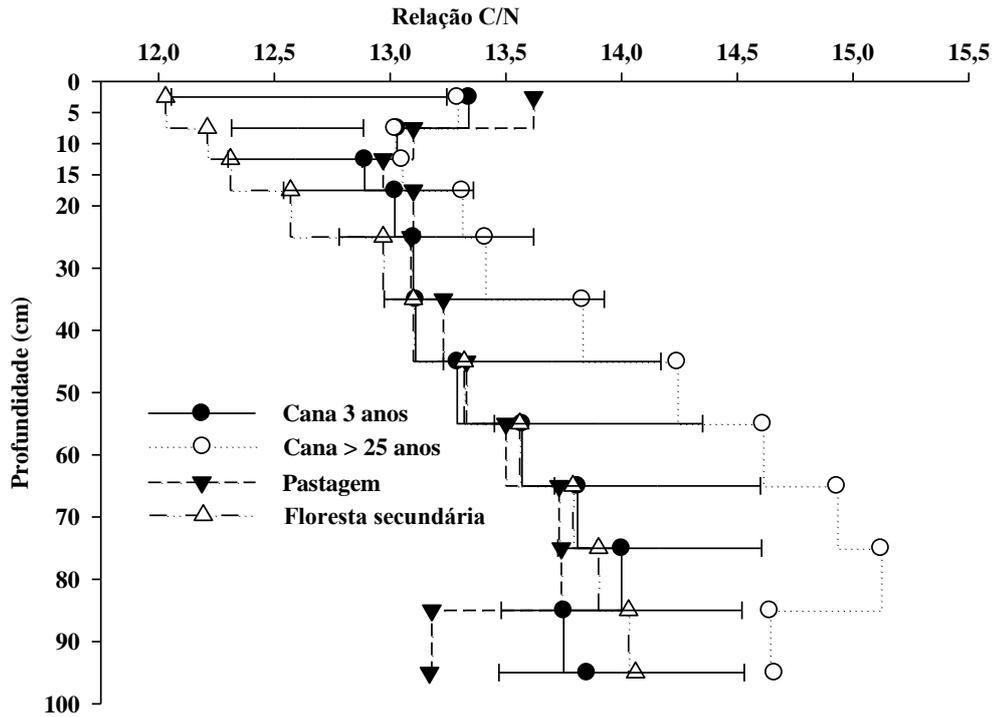
Com relação aos teores de N, as áreas de floresta secundária e pastagem apresentaram para camada mais superficial valores significativamente mais elevados que as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos e > 25 anos de cultivos.

Os teores de N nas camadas subsuperficiais da área de cana-de-açúcar > 25 anos apresentou valores semelhantes às áreas de floresta e pastagem, exceto para as camadas 10-15 e 20-30 quando a pastagem apresentou valores consistentemente menores. A área de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivos apresentou valores significativamente menores em relação aos outros três sítios entre as camadas de 20-100 cm.



**Figura 5.** Conteúdo total de C e N ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. (as barras indicam o erro padrão da média de 6 repetições).

A relação C/N do solo variou entre 12,03 e 15,12. Para camada 0-15 cm a área de floresta secundária apresentou valores significativamente menores que as áreas de pastagem e de cana-de-açúcar de 3 anos e > 25 anos (Figura 6). Para a camada de 15-40 cm a relação C/N apresentou proporções semelhantes entre os quatro sítios e para camada de 40-100 cm a área de cana-de-açúcar > 25 anos apresentou valores mais elevados significativamente. Vale destacar que as três áreas adjacentes floresta secundária, pastagem e cana-de-açúcar com 3 anos apresentaram similaridade da distribuição da relação C/N em profundidade e diferente da área de cana-de-açúcar > 25 anos, a qual não se encontra adjacente às outras três áreas.



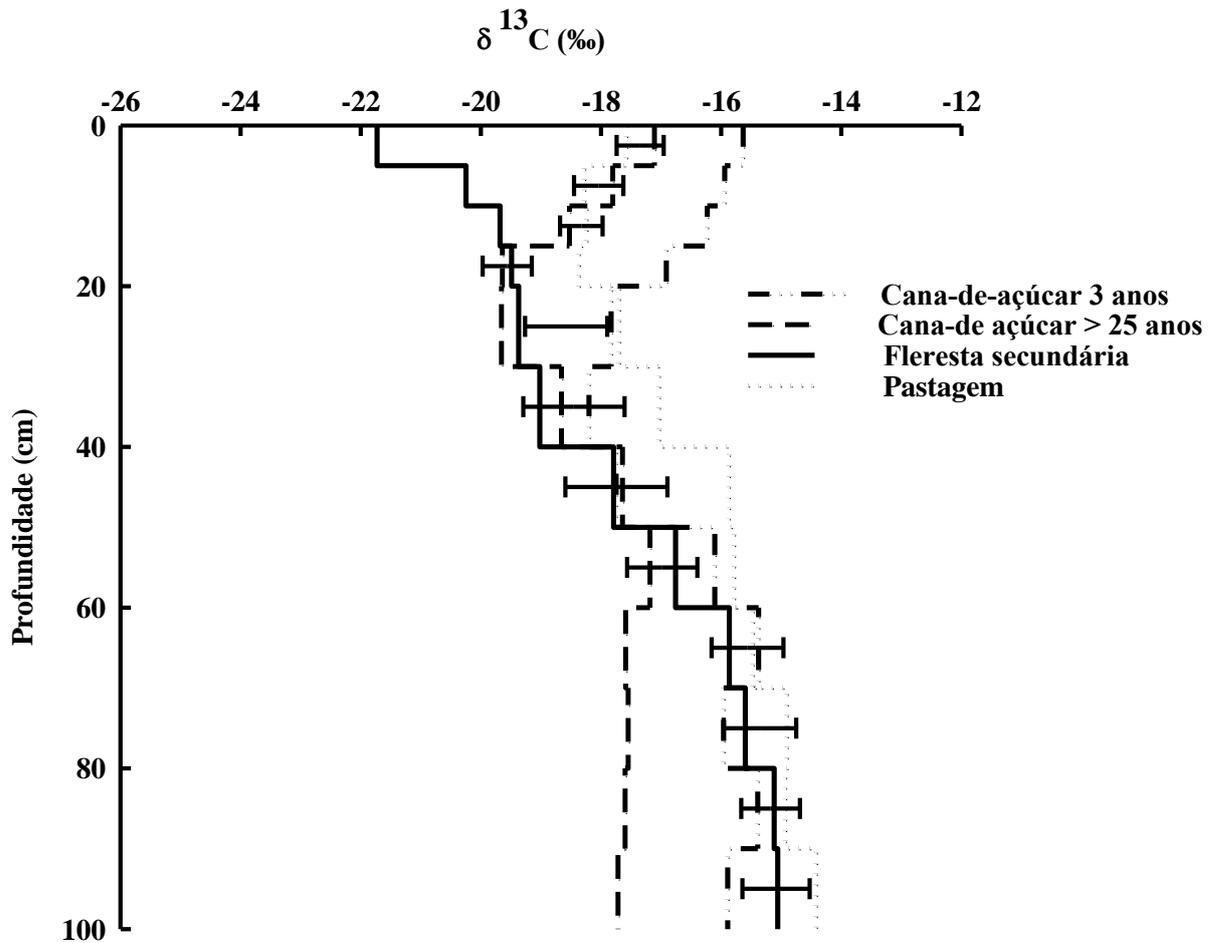
**Figura 6.** Relação C/N ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. (as barras indicam o erro padrão da média de 6 repetições).

Na camada superficial os valores da abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  expressaram a presença da vegetação instalada sobre o solo. Na área de floresta secundária, que estava sob vegetação lenhosa ( $\text{C}_3$ ) há 30 anos, revelou uma abundância de  $\delta^{13}\text{C}$  consideravelmente mais negativo do que as áreas sob  $\text{C}_4$ , cana-de-açúcar ou pastagens de gramíneas forrageiras, como era de se esperar. O solo que apresentou o maior teor de  $\text{C}_4\text{-C}$  (menos negativo  $\delta^{13}\text{C}$ ) foi o que estava sob a área de pastagem de *Brachiaria* por décadas e, recentemente cultivada com cana-de-açúcar (Figura 7).

A abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  nas camadas subsuperficiais da área de floresta secundária aumentou linearmente de  $-21,72\text{‰}$  para  $-15,05\text{‰}$ , valores semelhantes ao das áreas mais adjacentes (pastagem e cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo) apresentando em profundidade valores da abundância típicos de vegetação de ciclo fotossintético  $\text{C}_4$ .

Na profundidade de 60 cm a abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  do solo, diferiu consideravelmente entre a área de cana-de-açúcar > 25 anos e as demais áreas, apresentando valores mais negativos, acima de  $-17\text{‰}$ , e uma tendência para sinal  $\text{C}_3\text{-C}$ .

Os resultados da abundância natural de  $\delta^{13}\text{C}$  no perfil do solo em profundidade sob a floresta secundária e as áreas de pastagem e cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo não apresentam diferenças significativas, o que sugere dessa forma, que os perfis do solo das três áreas avaliadas representem a composição de  $\delta^{13}\text{C}$  de uma mesma vegetação.



**Figura 7.** Abundância natural de  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do solo ao longo do perfil do solo para as áreas de cana-de-açúcar com 3 anos de cultivo, > 25 anos cultivo, pastagem e floresta secundária. (as barras indicam o erro padrão da média de 6 repetições).

Não houve diferenças significativas entre os estoques de C e N do solo para o intervalo de 0-30 cm de profundidade corrigido para massa igual de terra entre a floresta secundária, pastagem e a área de cana-de-açúcar de 3 anos, que somaram, respectivamente, 55,05, 48,85 e 49,96 Mg C ha<sup>-1</sup> e 4,27, 3,74 e 3,83 Mg N ha<sup>-1</sup> (Tabela 2) A área sob cana-de-açúcar > 25 anos para esse intervalo de profundidade apresentou estatisticamente menores valores dos estoques de C do solo (46,04 Mg C ha<sup>-1</sup>) e N do solo (3,45 Mg N ha<sup>-1</sup>) em relação a floresta secundária, porém esses valores não diferiram dos outros dois sistemas de uso do solo.

**Tabela 2.** Estoque\* de Carbono e Nitrogênio do solo em área sob cana-de-açúcar cultivada a 3 anos ou > 25 anos, antes da amostragem, área de pastagem e Floresta secundária em Ribeirão Preto–SP

Uso da terra	Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )	Nitrogênio (Mg ha <sup>-1</sup> )	Relação C/N
Floresta Secundária	55,05a	4,27a	12,97a
Cana-de-açúcar 3 anos	49,96ab	3,83ab	13,09a
Cana-de-açúcar >25 anos	46,04b	3,45b	13,41a
Pastagem	48,85ab	3,74ab	13,9a
DMS	7,16	0,55	0,94
CV(%)	16,19	16,43	7,24
<b>0-100 cm</b>			
Floresta Secundária	118,36a	8,52a	14,06ab
Cana-de-açúcar 3 anos	109,97ab	8,02a	13,17b
Cana-de-açúcar >25 anos	103,25b	7,04b	14,66a
Pastagem	102,29b	7,79ab	13,84ab
DMS	11,87	0,78	1,05
CV(%)	12,36	11,25	8,56

\*Estoque de C e N corrigido para massa equivalente de solo sob floresta secundária (Tukey;  $p \geq 0,05$ ).

Quando os estoques de C no solo foram calculados para a camada de solo 0-100 cm (também em mesma base de massa de solo), a floresta secundária apresentou valor significativamente mais elevado (118,36 Mg C ha<sup>-1</sup>) do que as áreas de cana-de-açúcar > 25 anos (103,25 Mg C ha<sup>-1</sup>) e a pastagem (102,29 Mg C ha<sup>-1</sup>). A área de cana-de-açúcar mais nova apresentou estoque de C (109,97 Mg C ha<sup>-1</sup>) que não diferiu entre os três outros sistemas (Tabela 2). A floresta secundária e a área de cana-de-açúcar de 3 anos apresentaram maiores valores de estoque de N do solo, respectivamente 8,52 e 8,02 Mg N ha<sup>-1</sup>, quando comparados com a área de cana-de-açúcar mais velha (7,04 Mg N ha<sup>-1</sup>), mas não diferente da área de pastagem (7,79 Mg N ha<sup>-1</sup>), a qual não diferenciou da área de cana-de-açúcar > 25 anos.

### 3.6. DISCUSSÃO

Durante o processo de definição de um estudo de cronosequência alguns parâmetros devem ser levados em consideração, entre os mais importantes a textura do solo, a mineralogia, a história agrônômica das áreas e juntamente com o clima permitirão uma melhor compreensão de como a mudança no uso solo afetam os estoques de C e N do solo (FELLER et al., 2001; POST et al., 2001; JOHNSTON et al., 2009).

Estes parâmetros foram levados em consideração para seleção das quatro áreas estudadas, as quais pertencem ao mesmo clima e classe de solo e que apresentaram teores de argila em proporções semelhantes (Figura 4). Houve uma diferença em relação à densidade do solo nas camadas mais superiores (0-30 cm) do que em maior profundidade, definida pelo histórico de uso da terra entre as áreas diferentes (Tabela 01).

A textura semelhante e a mesma mineralogia entre as áreas indicam que as mesmas possuem uma capacidade potencial semelhante de armazenamento de C, o que pode ser controlado principalmente pela produção das culturas e também pelo histórico das áreas (FELLER; BEARE, 1997; SIX et al., 2002).

A área estudada possui solo da classe LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), de textura argilosa e com teores de argila que variaram entre 59 e 62%. Solos dessa classe apresentam elevada estabilidade da MO, o que é atribuído as concentrações de oxihidróxidos de ferro e alumínio, os quais promovem a complexação MO e preservando assim da biodegradação (RESENDE et al., 1997; ROSCOE et al., 2001; CANELLAS et al., 2008).

Em relação à variação da densidade do solo na camada superior e as diferenças encontrada entre as áreas de floresta secundária e cana com 3 anos de cultivo, Jantalia et al. (2006), explica que as diferenças na densidade entre as áreas sob manejo agrícola e áreas sob condições naturais na camada superficial do solo, são esperadas. Em virtude do preparo do solo e do tráfego de máquinas modificarem a distribuição das partículas do solo que ficam mais adensados pela redução dos macro e microporos do solo.

A densidade do solo variou de 1,13-1,29 kg.dm<sup>-3</sup> na camada mais superficial e na camada subsuperficial variou 1,02-1,31 kg.dm<sup>-3</sup>. De acordo com Torres e Saraiva (1999), em condições de campo, as amplitudes de variação da densidade global para solos argilosos (60-70%), vão desde 1,00 kg.dm<sup>-3</sup>, sob condições naturais e rico em matéria orgânica, a até 1,45 kg.dm<sup>-3</sup>, nos solos mal manejados e compactados.

As mudanças de uso da terra como, por exemplo, a conversão de ecossistemas naturais em agroecossistemas podem afetar a dinâmica da MOS (BROWN; LUGO, 1990; SZAKÁCS, 2007; BELIZÁRIO, 2008), alterando a taxa de adição e decomposição da MOS (ZINN et al., 2005), e assim, modificando os estoques de C e N do solo.

A utilização de traçadores estáveis como  $\delta^{13}\text{C}$  através de técnicas isotópicas, possibilita uma melhor compreensão da dinâmica do carbono do solo quando transcorre uma mudança de uso da terra (CERRI et al., 1985; VITORELLO et al., 1989; TARRÉ et al., 2001 SISTI et al., 2004; URQUIAGA et al., 2006).

A área de floresta secundária apresentou para análise de  $\delta^{13}\text{C}$  um valor pouco inferior a -22 ‰ na superfície e que foi menos negativo em profundidade, variando cerca de + 5 ‰ da camada superior para camada mais profunda do solo. Isso sugere uma contribuição maior de C<sub>3</sub> derivado da floresta na superfície, porém confirma o histórico de uso da área com pastagens. Surpreende, no entanto, a forte influencia de C de origem C<sub>4</sub> em profundidade (Figura 7). Estudos conduzidos em áreas florestais do Estado de São Paulo têm encontrado perfis semelhantes de distribuição do  $\delta^{13}\text{C}$  com a profundidade, o que tem indicado uma contribuição da matéria orgânica derivada de espécies C<sub>4</sub> da vegetação existente no passado (CERRI et al., 1985; BONDE et al., 1992; GOUVEIA et al., 2002).

O fato das áreas de floresta, pastagem e cana-de-açúcar com 3 anos, apresentaram convergência de  $\delta^{13}\text{C}$  com a profundidade em estudo indica que elas possuíam uma sucessão de vegetação semelhante até tempos recentes. Isso confirma a informação do histórico de pastagem como vegetação anterior e comum para as áreas, antes do uso atual da terra.

Por outro lado, a área ocupada com cana-de-açúcar há mais de 25 anos apresentou um perfil contrastante de  $\delta^{13}\text{C}$ , com sinal C-C<sub>3</sub> mais forte em profundidade e, conseqüentemente, pode ser atribuído um histórico diferente de vegetação. No entanto, depois de pelo menos 25 anos sob a cana-de-açúcar, é de se esperar que o C do solo esteja perto de um novo equilíbrio, independentemente do nível de armazenamento anterior de carbono (JOHNSTON et al., 2009). Para solos tropicais 20 anos é geralmente considerado como um tempo médio para que um novo equilíbrio seja atingido, desde que com o mesmo uso da terra (SMITH, 2005).

A ausência de manejo, o aumento expressivo de plantas daninhas e a diminuição do aporte de resíduo na superfície do solo da área de pastagem sugerem que esta esteja em declínio, o que é explicado em parte pelo aumento do conteúdo de C e N na camada mais superficial do solo e o declínio abrupto em profundidade desses conteúdos (Figura 5A e 5B).

Uma tendência de perda de raiz de *Brachiaria* com o aumento da profundidade, a diminuição da produtividade e o conseqüente declínio das áreas de pastagem tem sido reportado por Oliveira (2004), o que é consistente com o padrão de diminuição do conteúdo de C e N com o aumento da profundidade na área de pastagem.

O estabelecimento da área de floresta secundária não alterou os estoques de C do solo em 0-30 cm, o que também está relacionado com a condição de perturbação do solo e deposição de resíduos contínuos de C (Tabela 2). Neste caso, os estoques de C do solo de 0-100 cm, foi significativamente maior sob a floresta. O que é consistente com o maior aporte de matéria orgânica proporcionado pela floresta, proveniente da deposição contínua e variado de substrato em diferentes graus de suscetibilidade à decomposição e a diversidade de espécies (CARDOSO et al., 2010).

A recente introdução da cana em parte da área anteriormente sob pastagem não alterou significativamente os estoques de C no solo, mesmo quando comparado com os estoques de C do solo sob floresta secundária (Tabela 2). Esta é uma indicação de que o C do resíduo produzido após três safras consecutivas sem queima tenha sido suficiente para repor a perda C desde a preparação do solo para o plantio de cana.

A produtividade observada na área de cana de 82 Mg ha<sup>-1</sup> foi um pouco acima da média para o estado de São Paulo, que foi de 77 Mg ha<sup>-1</sup> em 2011 (IBGE, 2011).

A quantidade de palhada existente no solo (23 Mg ha<sup>-1</sup>) 15 dias após a colheita da área recentemente convertido de pastagem para a cana é uma indicação de que parte do resíduo deixado pelas colheitas anteriores ainda permanecia na área. De acordo com Boddey et al. (2008), cerca de 16 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo (matéria seca) é esperado de canaviais produzindo uma média de 80 Mg ha<sup>-1</sup> de cana.

No entanto, a área sob cana há mais de 25 anos apresentou os estoques mais baixos de C no solo, quer para 0-30 cm ou 0-100 cm, quando comparada com a área de cana mais jovem (Tabela 2). Na verdade, os estoques mais baixos de C no solo foram calculados para esta área embora não significativamente diferente do estoque de C no solo sob a pastagem, 0-100 cm.

Coincidentemente a  $\delta^{13}\text{C}$  do solo abaixo de 50 cm de profundidade apresentou uma influência reduzida de C<sub>4</sub> na matéria orgânica que também poderia estar relacionado a uma baixa contribuição dos resíduos subterrâneos da cana. Mesmo que o sistema de raízes da cana possa chegar a mais de 100 cm de profundidade, praticamente 70 a 80% do total é restrito aos primeiros 40 centímetros de profundidade (FARONI; TRIVELIN, 2006).

### 3.7. CONCLUSÕES

Os resultados sugerem que o plantio da cana em áreas de pastagens de baixa produção não modifica significativamente os estoques de C e N do solo, mas chegam a níveis inferiores aos da mata secundária (>30 anos).

A manutenção dos resíduos da colheita da cana-de-açúcar sem queima na área de cultivo indica que possam ser suficiente para repor a perda C desde a preparação do solo para o plantio de cana.

A camada de solo de 0-30 cm de profundidade apresenta aproximadamente 50% dos estoques de C e N quando comparado com os estoques na camada de 0-100 cm.

**4. CAPÍTULO II – FLUXOS DE N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> E VOLATILIZAÇÃO DE NH<sub>3</sub>  
DO SOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR APÓS APLICAÇÃO DE UREIA  
E VINHAÇA EM LATOSSOLO VERMELHO EM RIBEIRÃO  
PRETO-SP**

#### 4.1. RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar destaca-se como uma das principais fontes geradoras de bioenergia, utilizada em substituição aos combustíveis fósseis. A utilização de subprodutos oriundos das usinas, como a vinhaça, tem potencial para aumentar as emissões de gases de efeito estufa, além de possíveis perdas por volatilização de amônia. No entanto, são escassos os dados sobre o assunto. O objetivo desse trabalho foi quantificar as emissões de gases ( $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ ) e as perdas por volatilização de amônia do solo pelo uso de fertilizante e vinhaça. O estudo foi realizado em uma área de LATOSSOLO VERMELHO eutroférico (LVef), textura argilosa, na estação experimental do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) – Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto-SP. As amostragens de gases e as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  foram realizadas em delineamento experimental em bloco inteiramente casualizado, com seis tratamentos: CSP-controle sem palha, FSP-fertilizante sem palha, FCP-fertilizante com palha, CCP-controle com palha, VSP-vinhaça sem palha e VCP-vinhaça com palha e com cinco repetições e em três períodos de amostragens correspondentes aos anos de 2010, 2011 e 2012. Os tratamentos consistiram na aplicação de  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça equivalente a  $59 \text{ kg N ha}^{-1}$  em 2010, a  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$  em 2011 e a  $108 \text{ kg N ha}^{-1}$  em 2012, aplicação de ureia na dose de  $52 \text{ kg N ha}^{-1}$  em 2010 e  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  em 2011 e 2012 e controles. A variação temporal dos fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  nos três anos foi 5,12 a 42,49  $\text{g N-N}_2\text{O m}^2 \text{ h}^{-1}$ . Em 2010 não houve diferença entre tratamentos e em 2011 e 2012 seguiram a ordem  $\text{FSP} = \text{FCP} > \text{CSP} = \text{CCP} = \text{VCP} = \text{VSP}$ , os fatores de emissão variaram entre 0,01 e 0,4%. Os fluxos médios de  $\text{CH}_4$  nos períodos avaliados foram negativos. As perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  nos três anos foram menores que 15% para as doses de fertilizante e quando utilizado vinhaça as perdas foram menores que 2%.

## 4.2. ABSTRACT

The cultivation of sugarcane stands out as one of the main sources of bioenergy used to replace fossil fuels. The use of byproducts derived from plants such as vinasse, has the potential to increase emissions of greenhouse gases, as well as possible losses by ammonia volatilization. However, there are few data on the subject. The aim of this study was to quantify greenhouse gas emissions ( $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ ) and ammonia volatilization losses of soil by the use of fertilizer and vinasse. The study was conducted in an area of a clayey Oxisol (LVef) at the experimental station of the Instituto Agronômico of Campinas (IAC) - Pólo Regional the Centro-Leste (APTA), in Ribeirão Preto-SP. For sampling of gases and volatilization losses of  $\text{NH}_3$ , a study was conducted in a completely randomized block design with six treatments: CSP-control without straw, FSP-fertilizer without straw, FCP-fertilizer with straw, CCP-control with straw, VSP-vinasse without straw and VCP-vinasse with straw, with five replications and three sampling periods in the years 2010, 2011 and 2012. The treatments consisted of applying  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  equivalent to  $59 \text{ kg N ha}^{-1}$  vinasse in 2010,  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$  in 2011, and  $108 \text{ kg N ha}^{-1}$  in 2012, application of urea at a dose of  $52 \text{ kg N ha}^{-1}$  in 2010, and  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  in 2011 and 2012, and controls. The temporal variation of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in the three years was from  $5.12$  to  $42.49 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^2 \text{ h}^{-1}$ . In 2010 there was no difference among treatments, and in 2011 and 2012 it followed the  $\text{FSP} = \text{FCP} > \text{CSP} = \text{CCP} = \text{VCP} = \text{VSP}$  order. The emission factors ranged from 0.01 to 0.4%. The average flow rates of  $\text{CH}_4$  were negative. The  $\text{NH}_3$  volatilization losses in the three years of evaluation were less than 15% and 2% for doses of fertilizers and vinasse, respectively.

### 4.3. INTRODUÇÃO

O etanol de cana-de-açúcar é uma das principais opções de biocombustíveis em função da alta produtividade conseguida, mais de 6.000 L de etanol ha<sup>-1</sup>, e no caso do Brasil, pelo nível tecnológico conseguido em relação a gestão da energia no sistema, que permite que a queima de bagaço supra praticamente toda a energia fóssil requerida no processo de esmagamento e produção do álcool (SOARES et al., 2009).

A sustentabilidade ambiental associada ao bioetanol pressupõe um balanço energético positivo e redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), em comparação aos combustíveis fósseis substituídos. Para isso é necessário considerar todas as fontes emissoras ao longo de todo o ciclo produtivo da cana-de-açúcar, inclusive na gestão dos resíduos gerados na indústria, como a vinhaça.

A vinhaça é também conhecida como vinhoto, calda, tiborna, restilo, garapão, vinhote, caxixi, entre outras definições. É o co-produto líquido gerado pelas destilarias de álcool ao se efetuar a separação do etanol do mosto fermentado, caracterizada principalmente pela alta demanda biológica de oxigênio (DBO) (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983; FREIRE; CORTEZ, 2000).

De acordo com dados da UNICA (2012) a produção de vinhaça está na faixa de 12 litros para cada litro de álcool produzido. Sendo que, na safra 2010/2011 foram produzidos 25 bilhões de litros de etanol, o que corresponde à geração de cerca de 300 bilhões de litros de vinhaça ou 300 milhões de m<sup>3</sup>. O que faz com que a vinhaça seja considerada o principal subproduto da indústria sucroalcooleira.

Entre os principais elementos químicos que compõe a vinhaça tem-se o potássio, o nitrogênio e maior porcentagem de matéria orgânica, porém sua composição é bastante variada (LYRA et al., 2003). Tanto a matéria orgânica quanto os sais minerais contidos na vinhaça podem ser recuperados para uso direto como fertilizantes ou sob a forma de matéria-prima para outras aplicações (SILVA, 2011).

Ao longo do tempo, muitos estudos sobre os efeitos da vinhaça no solo concluíram que a vinhaça eleva o pH dos solos, aumenta a CTC, fornece e aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes, melhora a estrutura do solo, aumenta a retenção de água e melhora a atividade biológica. As ocorrências de eventuais efeitos negativos causados aos solos e às plantas estão relacionadas, geralmente, a doses excessivas (IVO et al., 2008).

Devido às altas doses de vinhaça aplicadas à cana-de-açúcar, que variam de 80 a 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, podendo chegar a 200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e que contêm significativas quantidades de material orgânico e nitrogênio, existe um potencial para que emissões de CH<sub>4</sub> e/ou N<sub>2</sub>O ocorram, embora sejam escassas informações sobre o assunto.

Associado as aplicações de vinhaça outro fato pouco conhecido envolve as emissões de GEE em função da permanência da palhada da cana-de-açúcar no campo. E como destaca Zotelli (2012) e Carmo et al. (2012) as práticas rotineiras do setor, como aplicação de fertilizantes nitrogenados e de vinhaça, necessitam ser avaliados em conjunto com a palhada, de modo a permitir um maior entendimento das interações dos manejos presentes na cultura da cana-de-açúcar no Brasil e a sua associação com as emissões de GEE.

Vale ressaltar que dentre os fatores que afetam a produtividade da cultura da cana-de-açúcar o manejo da adubação nitrogenada assume papel importante e as perdas por volatilização e desnitrificação dos compostos nitrogenados destacam-se no cenário de busca de sustentabilidade econômica e ambiental.

No Brasil a adubação nitrogenada é baseada principalmente no uso de fertilizantes em forma de grãos de ureia e cuja participação no mercado nacional é de aproximadamente 70 %

das 3,6 milhões de toneladas de N comercializadas no País em 2011 (ANDA, 2011). No entanto, pelas suas características químicas e facilidade de ser hidrolisada no solo, as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  constituem um dos principais fatores responsáveis pela baixa eficiência da ureia em fornecer N às culturas (ALVES et al., 2012a). Além de ser um fator de ineficiência para o fertilizante nitrogenado, a amônia volatilizada representa, entre outros problemas ambientais, uma fonte indireta de  $\text{N}_2\text{O}$ , pois o N volatilizado se deposita em outro local e sofre ação biológica que pode ocasionar a emissão do  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera (ALVES et al., 2012a).

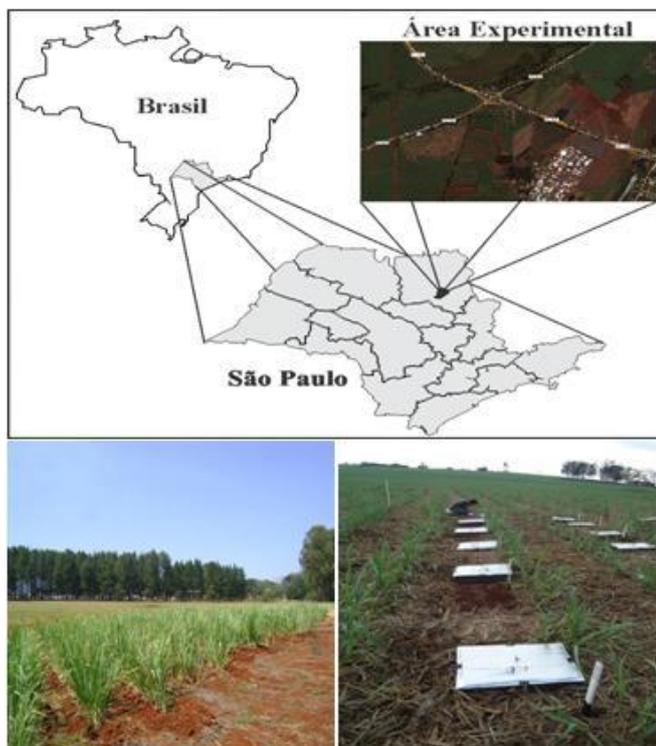
Um dos únicos estudos que trazem resultados de medições em campo (CARMO et al., 2012) mostrou que as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  de fertilizantes podem ser amplificadas com a presença de resíduos orgânicos, como vinhaça, torta de filtro e palhada. Os fatores de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  encontrados para o fertilizante são compatíveis com os propostos pelo IPCC (2006), porém a presença de resíduos aumenta os fatores em 2 a 3 vezes. No entanto, embora os resultados sejam interessantes numa visão integrada de manejo de fontes de N, a vinhaça não foi avaliada em separado, e não se sabe se seu efeito sobre os fatores de emissão é proporcionado pelas perdas do N que traz em sua composição, ou pela carga orgânica que pode intensificar a desnitrificação do N do fertilizante. Em seu estudo, Carmo et al. (2012) avaliaram a produção de  $\text{CH}_4$  pela vinhaça, cujos resultados sugerem que o solo tratado funcione como dreno desse gás, e não avaliaram perda de N por volatilização de  $\text{NH}_3$ .

Dessa forma, esse estudo teve como objetivo avaliar as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  bem como as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  após a aplicação de vinhaça e fertilizante nitrogenado na cultura da cana-de-açúcar, cultivada na região de Ribeirão Preto, um dos pólos de produção mais importantes do País.

## 4.4. MATERIAL E MÉTODOS

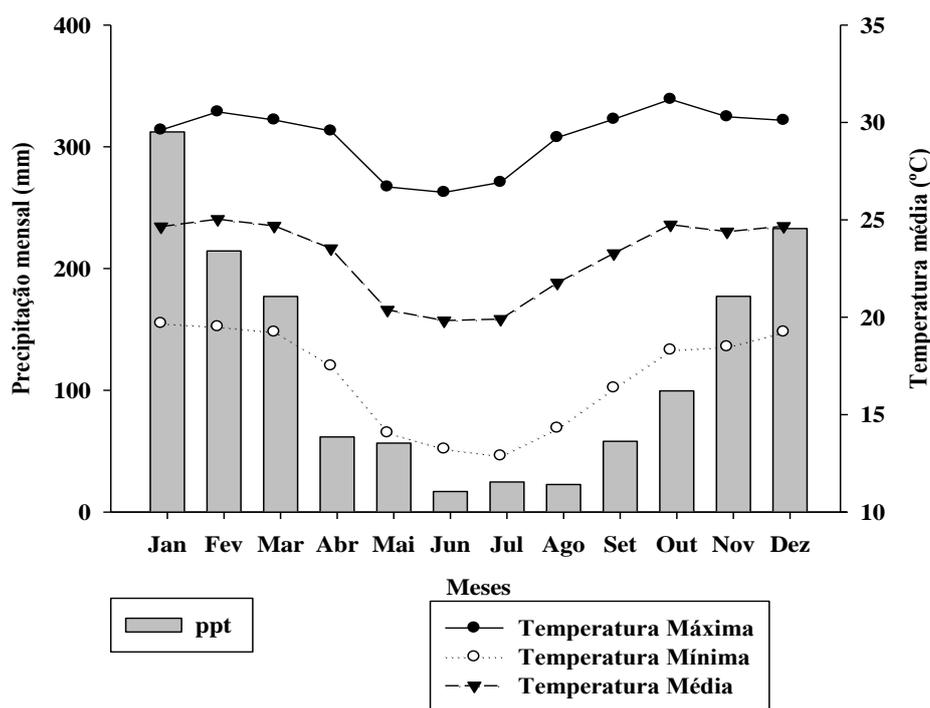
### 4.4.1. Condições experimentais

O estudo foi realizado na Estação Experimental do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) – Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto, Estado de São Paulo (24°10'40" S e 47°48'36" W). Fotos área experimental IAC-APTA Ribeirão Preto-SP (Figura 8).



**Figura 8.** Fotos área experimental IAC-APTA Ribeirão Preto (fotos Selenobaldo Sant'Anna).

O clima da região é do tipo tropical Aw, segundo a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual de 1422,5 mm, com temperatura máxima de 31 °C e mínima de 13 °C, e altitude de 546 m. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico (LVef), textura argilosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).



**Figura 9.** Distribuição da precipitação mensal e temperaturas máximas, mínimas e médias em Ribeirão Preto (SP). Os dados referem-se ao período de 2000 a 2012 (SAA/IAC/CIAGRO, 2012).

Os experimentos foram estabelecidos em três períodos de amostragens correspondentes aos anos de 2010, 2011 e 2012. O experimento implantado em 2010 localizou-se em área de plantio comercial localizada próxima ao Pólo Regional do Centro Leste (APTA) a variedade cultivada era a IACSP 95-5000 a qual estava na 2ª soca. E em 2011 e 2012 os experimentos foram instalados na área experimental do Pólo Regional do Centro Leste (APTA) e a variedade cultivada foi a IACSP 95-5000 a qual estava na 2ª soca em 2011 e 3ª soca em 2012. Anteriormente à instalação dos experimentos foram realizadas coletas de terra para determinação das características químicas as quais foram analisadas no Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, segundo métodos da Embrapa (2011) e Silva (1999). As amostras de terras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm (nº10 ABNT) e homogêneas. Os resultados das análises químicas para cada período de amostragem encontram-se nas Tabela 3 e Tabela 4.

**Tabela 3.** Resultado da análise química de terra antes da implantação do experimento no Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto-SP (07-10-2010)

Profundidade.	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	H+Al	Mg <sup>+2</sup>	P	K <sup>+</sup>
		-----cmolc/dm <sup>3</sup> -----			----- mg/dm <sup>3</sup> -----		
0-10	5,72	0,025	2,14	5,8	1,05	0,33	85,5
10-20	5,64	0,025	2,09	6,1	0,77	1,29	98,5

N - Método semimicro-Kjeldahl (Alves et al., 1994); C – Carbono orgânico método Walkley & Black (Raij et al., 1987). pH(H<sub>2</sub>O), Al, Ca e Mg, K e P (EMBRAPA-SNLCS, 2011)

**Tabela 4.** Resultado da análise química de terra antes da implantação do experimento no Pólo Regional do Centro-Leste (APTA), em Ribeirão Preto-SP (11-08-2011)

Prof.	C	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	H+Al	Mg <sup>+2</sup>	P	K <sup>+</sup>	N
	%		-----cmolc/dm <sup>3</sup> -----				----- mg/dm <sup>3</sup> -----		%
0-10	1,52	5,54	0,03	3,34	5,50	1,18	7,97	73,25	0,16
10-20	1,51	5,56	0,04	3,24	5,81	1,15	7,66	86,00	0,15

N - Método semimicro-Kjeldahl (Alves et al., 1994); C – Carbono orgânico método Walkley & Black (Raij et al., 1987). pH(H<sub>2</sub>O), Al, Ca e Mg, K e P (EMBRAPA-SNLCS, 2011) Prof. (Profundidade)

A área agrícola de Ribeirão Preto está situada, predominantemente, em Latossolos de origem basáltica, com cultivo de cana, pastagens, citros e culturas anuais. A região é grande produtora de cana, que responde por grande parte da produção no Estado de São Paulo.

O delineamento experimental foi em blocos completos casualizados, com seis tratamentos: CSP-controle sem palha, FSP-fertilizante sem palha, FCP-fertilizante com palha, CCP-controle com palha, VSP-vinhaça sem palha e VCP-vinhaça com palha, cinco repetições e três períodos de amostragens. Os tratamentos consistiram na aplicação de 160 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça equivalente a 59 kg N ha<sup>-1</sup> em 2010, a 70 kg N ha<sup>-1</sup> em 2011 e a 108 kg N ha<sup>-1</sup> em 2012, (Tabela 5) e aplicação de ureia na dose de 52 kg N ha<sup>-1</sup> em 2010 e 100 kg N ha<sup>-1</sup> em 2011 e 2012. Sendo estabelecidos para todos os períodos controles sem adição de vinhaça e adubo nitrogenado, em áreas com e sem a presença de palhada de cana-de-açúcar. A variedade cultivada em todo experimento corresponde a IACSP 95-5000. A quantidade de palhada quantificada no momento da instalação do experimento em cada período de amostragem foi em base de matéria seca de 25,02 ± 0,9 Mg ha<sup>-1</sup> em 2010, 25,60 ± 7,2 Mg ha<sup>-1</sup> em 2011 e 20,63 ± 2,7 Mg ha<sup>-1</sup> em 2012.

**Tabela 5.** Resultado da análise químicas da vinhaça no momento da aplicação.

Data	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub>	N	K <sup>+</sup>	C
	-----mg L <sup>-1</sup> -----					g%
11/10/2010 <sup>1</sup>				312,6		
14/08/2011 <sup>2</sup>	<0,1	0,5	28,3	371,6	2193,2	9,70
05/11/2012 <sup>3</sup>	<0,1	0,4	35,6	578,5	3418,5	5,04

i. Nitrogênio Nitrato – NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Método Redução de Cádmio – 4500 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> E.

ii. Nitrogênio Nitrito – NO<sub>2</sub><sup>-</sup> Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Método Colorimétrico – 4500 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> B.

iii. Nitrogênio Amoniacal – NH<sub>3</sub><sup>-</sup> Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Método Titrimétrico – 4500 NH<sub>3</sub> C.

iv. Nitrogênio Total – Kjeldhal - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Método Kjeldhal – 4500 N B.

v. Potássio – K<sup>+</sup> – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – Digestão Nitro-Perclórica – 3030 H – Determinação por Espectrofotômetro de Absorção Atômica Chama ar-acetileno – 3111 B

vi. Matéria Orgânica - Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos – Capítulo III, pág. 120.

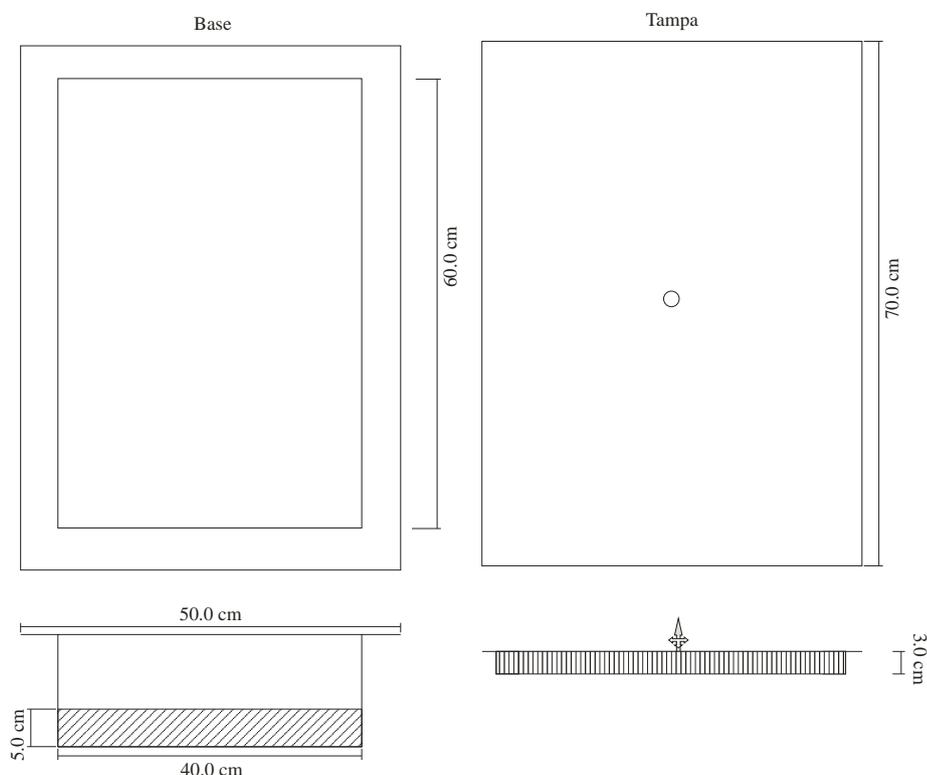
1, 2, 3 Correspondem aos dias da aplicação em cada experimento, respectivamente

No primeiro período a área foi demarcada no dia 07 de outubro de 2010, e as amostragens de gases iniciaram no dia 08. Os tratamentos foram aplicados no dia 11. O segundo período foi estabelecido em 11 de agosto de 2011, e as amostragens de gases iniciadas no dia 12 e os tratamentos aplicados no dia 14. O terceiro período foi implantado em

31 de outubro de 2012 e amostragens de gases iniciadas em 01 de novembro de 2012 e os tratamentos aplicados em 05 de novembro.

#### 4.4.2. Coleta e análise de amostras de gases do solo

Para amostragens dos fluxos de  $N_2O$  e  $CH_4$  em cada parcela, foi instalada câmara estática fechada perpendicularmente à direção das linhas de plantio da cana. Cada câmara era composta de uma base de metal retangular (40 x 60 cm), com 15 cm de altura, sendo inserida no solo até profundidade de 5 cm (Figura 10). A parte exposta da câmara possui uma borda, na qual se inseria uma tampa retangular, com largura e comprimento iguais aos da base. Esta parte superior era acoplada na base metálica nos eventos de amostragem. A tampa possui no seu perímetro, uma borracha para vedar o sistema quando a tampa era acoplada à base. Presilhas colocadas nos quatro lados da câmara mantinham a tampa pressionada contra a base. E sobre cada tampa foi adaptado uma válvula de três vias, para permitir a retirada dos gases no momento da amostragem.



**Figura 10.** Croqui detalhado da câmara coletora de  $N_2O$  da unidade experimental

As amostragens de gases para quantificar os fluxos de  $N_2O$  e  $CH_4$  foram feitas diariamente no período da manhã, entre 7h00 e 9h30, durante 15 dias consecutivos, e logo após esse período a cada 2 dias, e na ocasião de chuvas as amostragens seguiam nos três dias após o evento. O tempo de incubação nas câmaras foi estabelecido em 30 minutos ( $T_{30}$ ) e para cada câmara foi realizada uma coleta de tempo inicial ( $T_0$ ). As amostragens foram realizadas com seringas de polipropileno (60 ml) equipadas com válvula de 3 vias e trava luer lock.

Com auxílio de um vacuômetro manual frascos de cromatografia previamente lacrados com borracha butírica eram evacuados até uma pressão negativa de 80 KPa e em seguida um volume de 25 mL do gás das seringas era transferidos para os frascos de vidros.

Em cada evento de amostragem também foram amostradas as temperaturas do ar, do interior das câmaras no início das coletas e a temperatura no interior da câmara no momento da abertura, 30 minutos depois. Também foram medidas as temperaturas do solo a 5 cm distribuídas aleatoriamente na área.

As análises para determinação das concentrações de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram realizadas no laboratório de Cromatografia Gasosa da Embrapa Agrobiologia, utilizando um cromatógrafo de gás (Perkin Elmer, Autosystem), equipado com detectores de captura de elétrons e de ionização de chama. O resultado da análise de cada amostra era obtido sob o valor da integração da área de um gráfico, variando de acordo com as concentrações de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>. Antes de cada conjunto de análises, eram injetadas amostras de padrões de concentrações conhecidas de N<sub>2</sub>O (352 ppb, 800 ppb, 1200 ppb e 10000 ppb) e de CH<sub>4</sub> (1,49 ppm, 10 ppm, 10000 ppm) para o cálculo das concentrações de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> respectivamente em cada amostra.

Os fluxos de gases (F) foram calculados pela equação 2 (JANTALIA et al., 2008).

$$F = \frac{\delta C}{\delta t} \left( \frac{V}{A} \right) \frac{M}{Vm} \quad \text{equação 2.}$$

Em que,  $\delta C/\delta t$  é a mudança de concentração do gás na câmara no intervalo de incubação;  $V$  e  $A$  são respectivamente o volume da câmara e a área de solo coberta pela câmara;  $M$  é o peso molecular de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> e  $Vm$  é o volume molecular na temperatura de amostragem.

#### 4.4.3. Amostragem e análise de solo

Foram realizadas amostragens de solo para determinar a umidade e a concentração de formas minerais de N no solo (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Foram coletadas amostras simples, na profundidade de 0-10 cm, com o auxílio de espátula. As amostras de solo foram tomadas a cada três amostragens de gases, no período da manhã, acompanhando as amostragens de gases. Elas foram colocadas em embalagens plásticas, congeladas e posteriormente encaminhadas ao laboratório para a análise das formas minerais de N. Para a medida da umidade gravimétrica, foram retiradas amostras de terra juntamente com as amostragens de solo para determinação das formas de N.

No fim de cada período de estudo foram determinados o espaço poroso saturado com água EPSA (equação 3). Para determinação dos valores da densidade do solo utilizada no cálculo do EPSA foram coletadas no fim do de cada período de estudo amostras de terra, com auxílio de anel de Kopeck, em todas as parcelas e no interior de cada câmara. E também foi determinada a densidade das partículas e calculado o volume total de poros, para obter o EPSA (equação 4).

$$EPSA = \frac{(Ug \times Ds)}{Vtp} \times 100 \quad \text{equação 3.}$$

$$Vtp = \left( 1 - \left( \frac{Ds}{Dp} \right) \right) \quad \text{equação 4.}$$

Onde:  $Ug$  é a umidade gravimétrica (g);  $Ds$ , a densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);  $Dp$ , a densidade das partículas (Mg m<sup>-3</sup>); e  $Vtp$ , a porosidade total do solo.

Para determinação das formas minerais de N no solo, as amostras foram descongeladas e pesados 20 g de solo de cada amostra em Erlenmeyer. Adicionaram-se 60 mL de solução extratora de KCl 2M, sendo posteriormente colocados em agitador horizontal e mantidos em movimento pelo período de 30 minutos a 200 rpm. As amostras foram filtradas e

a solução obtida foi armazenada em geladeira (5°C) para posterior análise de cada forma N mineral. O equipamento utilizado para esta determinação consistiu de espectrofotômetro digital Shimadzu UV-1203. Foram preparadas duas curvas analíticas com padrões de baixa concentração de N na forma de nitrato e na forma de amônio (0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0 mg N L<sup>-1</sup>), e outra com concentrações mais altas, na faixa de 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0 e 10,0 mg N L<sup>-1</sup>.

A metodologia para determinação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foi à utilizada por Olsen (2008) baseada na espectrofotometria em Ultra Violeta (UV). As concentrações de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram determinadas em dois comprimentos de onda, sendo o resultado da medida de absorbância em 275 nm multiplicado por dois e subtraído da leitura em 220 nm. O resultado equivale à quantidade de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na amostra.

Para medir a concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> foi utilizado o método do salicilato proposto por Kempers; Zweers (1986). Os reagentes preparados foram:

R1: 33 g de salicilato de sódio (NaC<sub>7</sub>H<sub>5</sub>O<sub>3</sub>) e 20 mg de nitroprussiato de sódio (Na<sub>2</sub>Fe(CN)<sub>5</sub>NO.5H<sub>2</sub>O) em 100 mL de água destilada;

R2 -9,33 g de citrato de sódio e 4 g de hidróxido de sódio (NaOH) em água destilada para um volume final de 100 mL;

R3 (Mix) – É um combinado dos reagente 1 e 2, que se obtém pela mistura e 1 parte do reagente um com duas partes do reagente dois;

R4 – Hipoclorito de sódio comercial (água sanitária), no caso de hipoclorito 10% diluir 5 mL em 25 mL de água destilada.

Para a determinação, 4 mL do extrato de terra com KCl 2M foram transferidos para tubo de ensaio de 10 mL. Adicionou-se 0,1 mL de hipoclorito de sódio e 0,9 mL do reagente R3. A reação ocorria no escuro por ± 120 minutos. As concentrações eram lidas em 647 nm.

Os cálculos para determinação das concentrações das formas minerais de N foram feitos por meio de regressões lineares entre as concentrações dos padrões e respectivas absorbâncias, encontrando-se fator de transformação da leitura das amostras em concentração. Todos os resultados relativos ao N mineral foram expressos em relação ao solo seco a 105°C.

#### **4.4.4. Balanço de gases do solo**

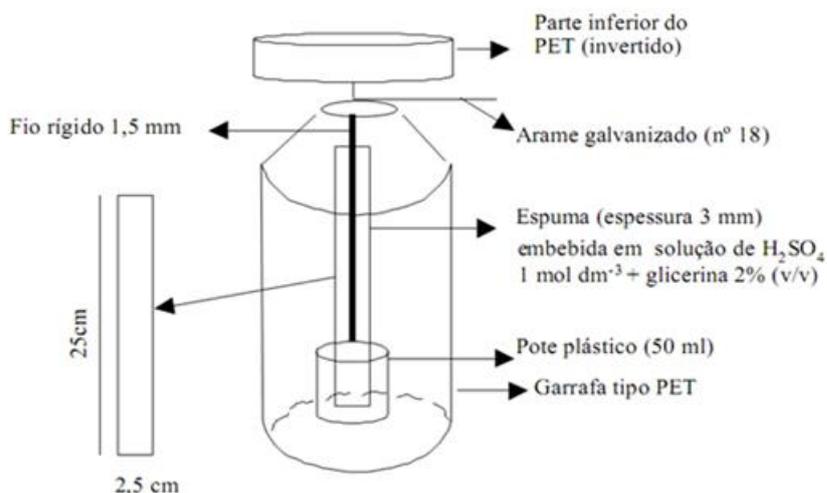
O balanço de gases leva em consideração as perdas ou ganhos de C no solo expressas anualmente por hectare na forma de CO<sub>2</sub>. Para a realização do balanço de gases, utilizaram-se os dados do sistema de produção de cana-de-açúcar e de produção de etanol descritos no estudo de Soares et al. (2009). Nesse estudo, não havia informação sobre as emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> associadas à aplicação de fertilizante nitrogenado e vinhaça na cultura da cana-de-açúcar, com ou sem a manutenção da palhada após a colheita, tendo sido usadas estimativas baseadas na guia do IPCC (2006) e na experiência dos autores. No estudo de Soares et al. (2009), não foi considerado o efeito da conversão de pastagens para cana-de-açúcar sobre os estoques de C do solo.

Assim, os índices de emissão ou remoção de gases de efeito estufa determinados nesta tese foram usados para aperfeiçoar o balanço de gases do estudo de Soares et al. (2009). Para esta finalidade, o balanço foi feito para uma expectativa de tempo de 100 anos. Os fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram integrados ao longo do ano, e calculadas as emissões ou drenos por hectare, também expressas em equivalentes de CO<sub>2</sub>, tal como realizado por Soares et al. (2009).

#### **4.4.5. Avaliação da volatilização de N-NH<sub>3</sub> pela aplicação vinhaça e ureia**

Para a quantificação das perdas de N por volatilização de NH<sub>3</sub> utilizou-se sistema de câmaras coletoras com sistema semiaberto livre estático (SALE) de captura da NH<sub>3</sub> perdida, adaptado e calibrado por Araújo et al. (2009). O coletor foi confeccionado a partir de garrafa

plástica transparente de politereftalato de etileno (PET), com capacidade para 2 litros. A parte inferior de cada garrafa foi removida para constituir uma câmara coletora. As câmaras possuem 10 cm de diâmetro e abrangem 0,008 m<sup>2</sup> de área, dentro dos quais foi suspensa uma fita de espuma de 3 mm umedecida em 10 mL de solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 mol L + glicerina 2% (v/v), responsável pela retenção do N volatilizado (Figura 11).



**Figura 11.** Esquema do sistema coletor de N-NH<sub>3</sub> semi-aberto estático –SALE (ARAÚJO et al., 2009).

As câmaras foram instaladas na ocasião do estabelecimento dos tratamentos, sendo retiradas e renovadas a cada 2 dias durante um período de 15 dias consecutivos. Depois de retiradas, as amostras foram preparadas e enviadas para análise conforme descrito por Araújo et al. (2009). Para o cálculo da porcentagem de N perdido na forma de NH<sub>3</sub>, considerou-se apenas a quantidade de N aplicada na área referente à câmara de volatilização.

#### 4.4.6. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa estatístico R versão 2.15.2 livre e pacote Sisvar (Versão 5.1 – Build 73, 1999 – 2007, UFLA). Para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias dos erros foram aplicados os testes de Lilliefors e de Cochran & Bartley, respectivamente, contidos no programa estatístico R 2.15.2.

Os gráficos que demonstram a variação dos fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> pelo tempo foram construídos com a média de cada amostragem e respectivo erro padrão.

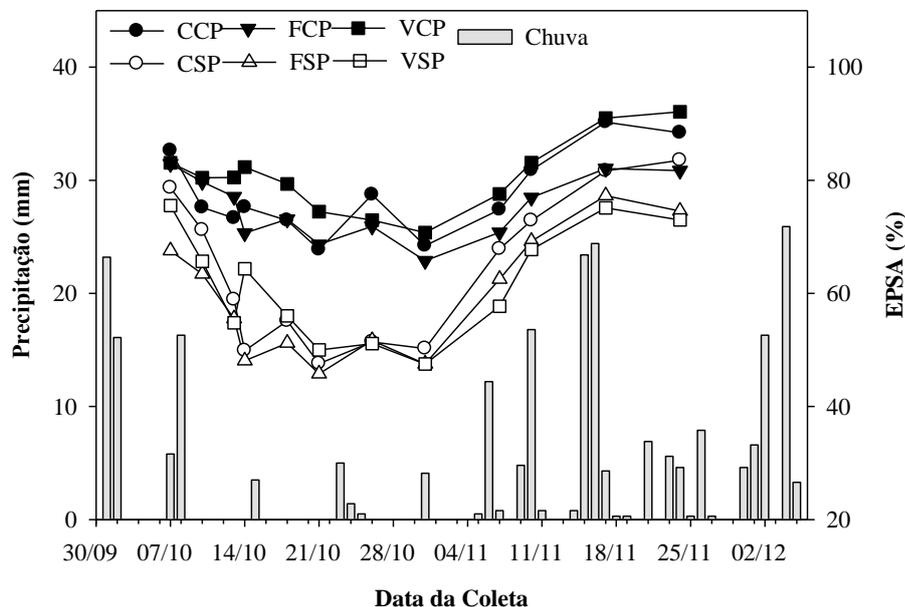
Nos dados de emissões acumuladas de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, foram realizadas a análise de variância (ANOVA) com a aplicação do teste F e, para as variáveis cujo teste F foi significativo, compararam-se as médias de tratamentos pelo teste de Tukey, ( $p \geq 0,05$ ). Em algumas variáveis, foi encontrada ausência de normalidade dos erros, sendo os dados de emissão de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> transformados pela função  $f(x)=\ln(x)$  e aplicado teste de Kruskal-Wallis.

As relações entre os fluxos de N<sub>2</sub>O e dados das variáveis de solo e os fatores de emissão provenientes de fertilização foram testadas pelo uso de correlação de Pearson.

## 4.5. RESULTADOS

### 4.5.1. Avaliações do primeiro período ano 2010

Para o primeiro período de estudo iniciado no dia 8 de outubro de 2010 e finalizado no dia 30 de novembro de 2010, a temperatura média do ar foi de 25,5 °C, com extremos oscilando entre 12,6 a 36,0 °C, e a precipitação pluviométrica total nesse período foi de 150,4 mm. Entre os dias 01 e 08 de outubro de 2010, o total de precipitação acumulada foi de 61,4 mm. Entre o período de 14 de outubro a 14 de novembro de 2010 o total de chuva acumulada foi de 51,2 mm e entre os dias 15 a 30 de novembro de 2010 o volume acumulado de chuva foi de 83,7 mm. Assim os maiores volumes de chuva ocorreram nos dias anteriores à aplicação dos tratamentos e nos 15 dias finais (Figura 12).



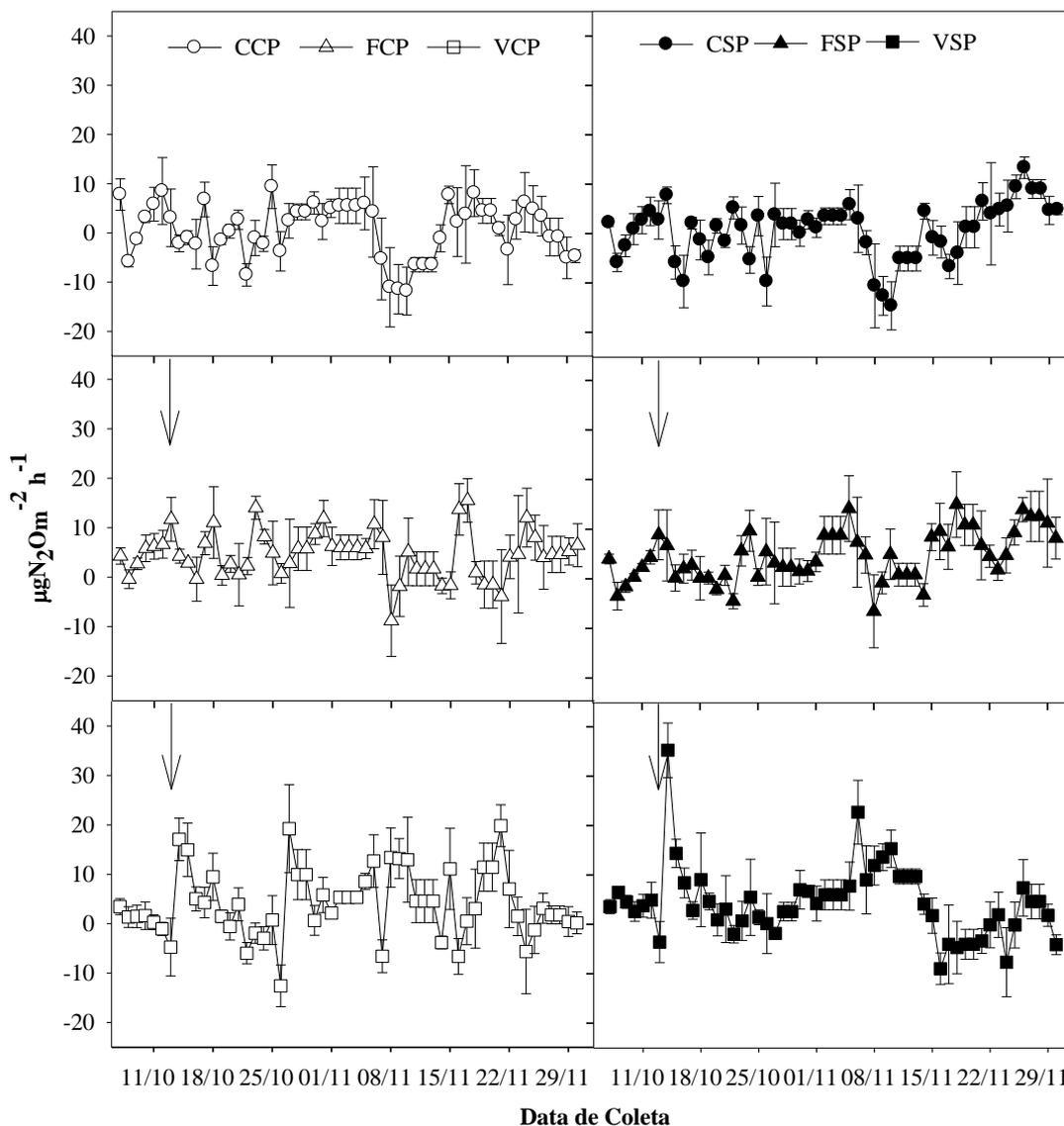
**Figura 12.** Distribuição da precipitação (barras verticais) e porcentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 04/10/2010 a 06/12/2010. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Os valores de densidade do solo variaram de 1,18 a 1,23 Mg m<sup>-3</sup>, não diferindo estatisticamente entre os tratamentos (Tukey;  $p \geq 0,05$ ). O espaço poroso saturado com água (EPSA) diminuiu ao longo do período de avaliação, sendo maior no período inicial do estudo, em função das chuvas e retornando a valores mais elevados próximo do final do primeiro período também em função de um maior volume de chuva (Figura 12).

A presença da palhada, quantificada em base de matéria seca em  $25,02 \pm 0,9$  Mg ha<sup>-1</sup> com uma espessura de aproximadamente 5 a 6 cm, contribuiu para manter maior saturação do solo com água. Os níveis de EPSA na área com palhada variaram de uma faixa de 70-80%, antes da aplicação dos tratamentos, e após as chuvas, para cerca de 65% próximo ao dia 30 de Outubro e retornando a valores elevados em torno de 82 a 92% no final das avaliações.

Na área onde a palhada foi removida, o EPSA variou de 60-80 % no início do experimento para menos de 50 %, próximo ao dia 30 de outubro marcado por um menor volume de chuva até essa data e retornando a valores de EPSA em torno de 60-80% no final das avaliações.

Não houve indicação clara de que a aplicação de vinhaça ou ureia provocou qualquer aumento importante nos fluxos de N<sub>2</sub>O (Figura 13).



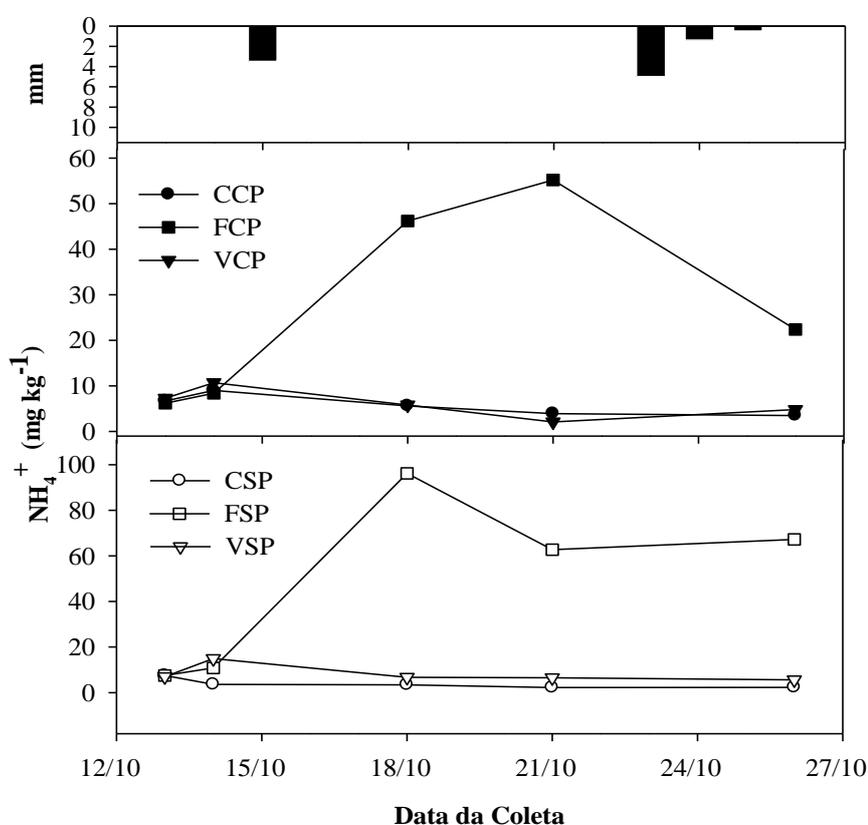
**Figura 13.** Fluxos médios diários de óxido nítrico para os tratamentos avaliados durante o primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Para os tratamentos controles (CCP e CSP) respectivamente, os fluxos de N<sub>2</sub>O foram em média 6,5 e 6,6 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, para os 54 dias de medição. A adição de ureia aumentou esta média para 8,1 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, para o tratamento fertilizante com palhada (FCP) e para o tratamento sem a presença de palhada (FSP) o valor foi de 7,3 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>

$\text{h}^{-1}$ , enquanto que a adição de vinhaça resultou em mudança semelhante nos tratamentos com e sem a presença da palhada (VCP e VSP) respectivamente 8,4 e 8,5  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ .

Os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  diários foram somados para estimar a emissão total para os 54 dias de avaliação e foi expresso em uma base por hectare. Para os tratamentos controles (CCP e CSP) as emissões foram respectivamente de 61,1 e 62,3  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , enquanto para os tratamentos em que foi aplicada ureia (FCP e FSP), 76,5 e 69,0  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente e vinhaça (VCP e VSP) 78,9 e 79,9  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente. Não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos.

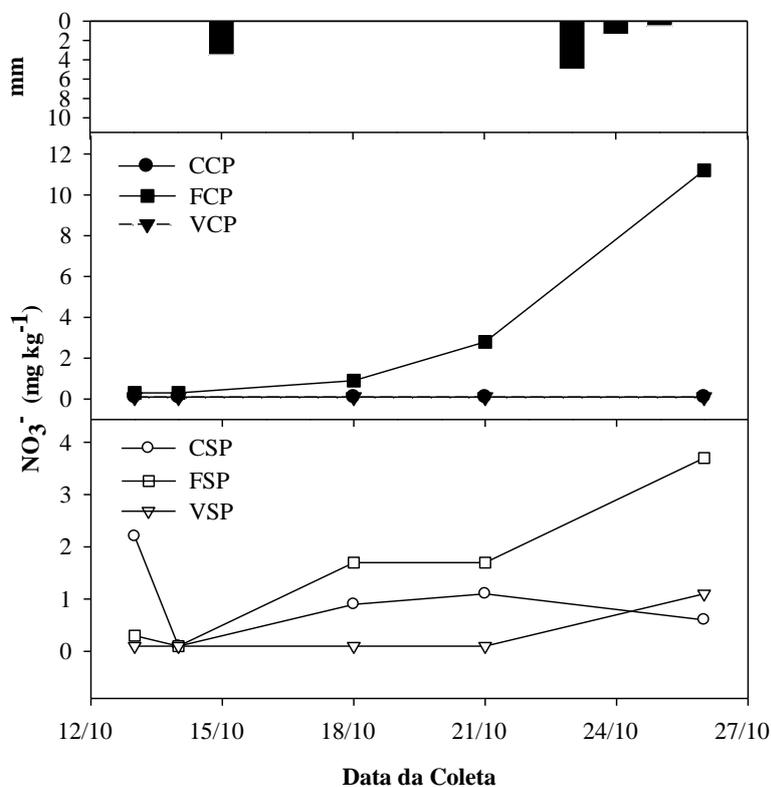
Durante o primeiro período quando da aplicação de fonte nitrogenada foi possível observa uma maior concentração de N mineral na forma de  $\text{NH}_4^+$  no solo na camada de 0-10 cm nos tratamentos onde foi aplicada a ureia na dose de 52  $\text{kg N ha}^{-1}$  (Figura 14).



**Figura 14.** Variação da concentração do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo (0-10 cm) primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

As concentrações de amônio aumentaram nos primeiros dias após a aplicação nos tratamentos com fertilizante e permaneceram elevadas até final das avaliações. As concentrações médias entre os tratamentos foram ao longo dos 54 dias de avaliação correspondentes a 5,74 e 3,80  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente, 6,14 e 8,14  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente e 27,68 e 48,88  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente. A quantificação total de amônio ao final do período foi de 28,70 e 19,00  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente, 138,40 e 244,40  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente e de 30,70 e 40,70  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente.

As concentrações de nitrato  $\text{NO}_3^-$  durante o mesmo período de estudo permaneceram em níveis baixos durante o transcorrer das avaliações tendo os seus valores sido elevados próximo do final das avaliações, e esse comportamento foi evidenciado entre os tratamentos exceto entre CCP e VCP, permaneceram constantes ao longo do tempo (Figura 15).

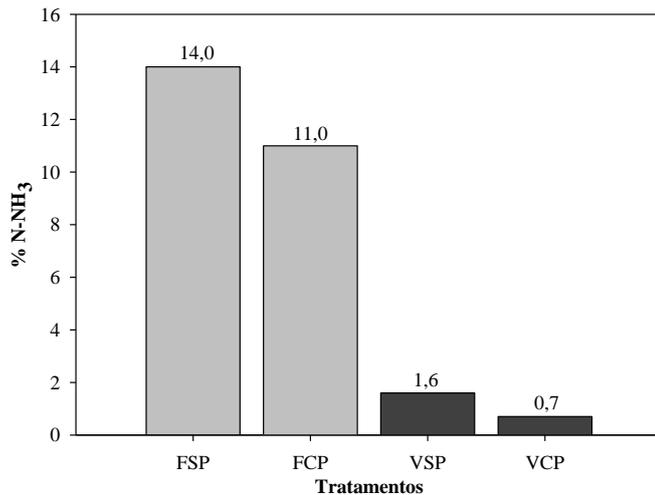


**Figura 15.** Variação da concentração do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo (0-10 cm) primeiro período de 04/10/2010 a 06/12/2010. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

As concentrações médias entre os tratamentos foram ao longo dos 54 dias de avaliações correspondentes a 0,10 e 0,98  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente, 3,10 e 1,50  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente e 0,10 e 0,30  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente. A quantificação total de nitrato ao final do período foi de 0,50 e 4,90  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente, 15,50 e 77,50  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente e de 0,50 e 1,50  $\text{mg NO}_3^- \text{ kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente.

Durante o primeiro período, as perdas por volatilização de amônia variaram em função das fontes de N. A utilização de ureia na dose de 52  $\text{kg N ha}^{-1}$  resultaram em maiores perdas quando comparada a aplicação 160  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a 59  $\text{kg N ha}^{-1}$ ).

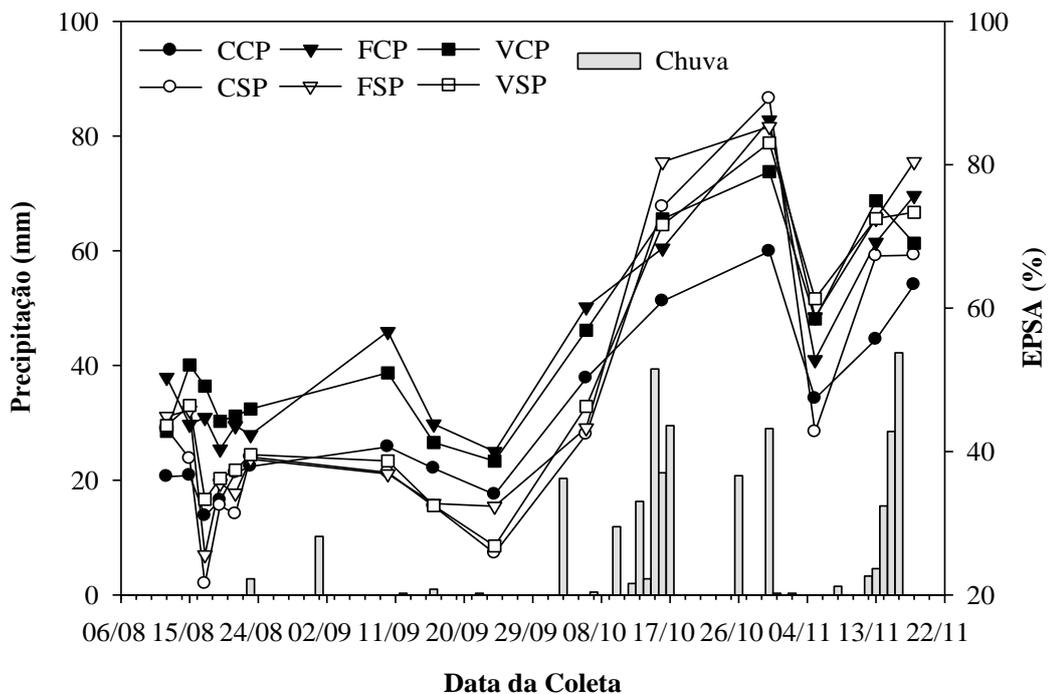
Quando da utilização da ureia o tratamento onde a palha foi retirada (FSP) apresentou perda de 14% e tratamento com presença da palha (FCP) a perda foi de 11%. Essas perdas foram maiores quando comparada com o a aplicação de vinhaça a qual perdeu 1,6% e 0,7% nas formas de VSP e VCP respectivamente (Figura 16).



**Figura 16.** Perdas por volatilização de amônia período de 04/10/2010 a 06/12/2010. FSP: Fertilizante sem palha; FCP: Fertilizante com palha; VSP: Vinhaça sem palha; VCP: vinhaça com palha.

#### 4.5.2. Avaliações do segundo período ano 2011

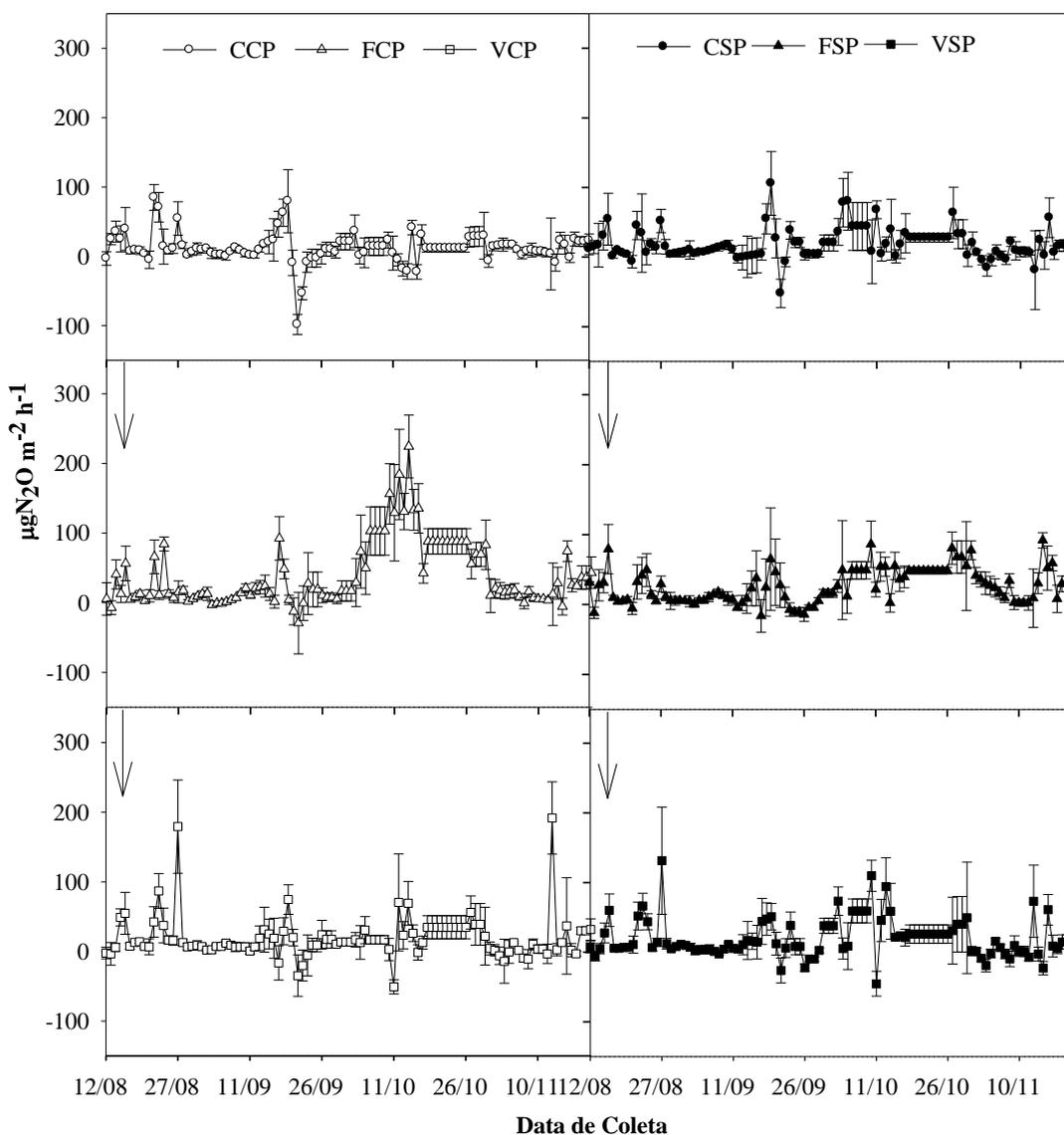
O segundo período de estudo compreendeu 107 dias de avaliações das emissões. A temperatura média do ar foi de 23,3 °C, com extremos oscilando entre 8,2 a 36,0 °C, e a precipitação pluviométrica total de 304 mm, com os maiores volumes de chuva ocorrendo entre os dias 03 e 30/10 com 193,8 mm e entre os dias 12 e 16/11 com 94,1 mm. Os maiores volumes de chuvas ocorreram 58 dias após a instalação do experimento (Figura 17).



**Figura 17.** Distribuição da precipitação - ppt (mm) e percentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 12/08/2011 a 20/11/2011.

Os valores de densidade do solo variaram de 1,13 a 1,27 Mg.m<sup>-3</sup>, não diferindo estatisticamente entre os tratamentos (Tukey; p ≥ 0,05). O espaço poroso saturado com água EPSA aumentou ao longo do período de avaliação em função das chuvas. As observações iniciais referentes à primeira semana mostraram os menores valores 21,6% e 25,6%, onde a palhada foi retirada e os maiores valores 50,3% e 52,0% para as áreas onde a palhada foi mantida (Figura 17).

No final da segunda época de amostragem e em função de uma maior concentração de chuva, o EPSA manteve-se elevado para todos os tratamentos independente da presença da palhada na área, e variaram entre 63,2% e 80,4%.



**Figura 18.** Fluxos médios diários de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) para os tratamentos avaliados durante o segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

A variação temporal dos fluxos de N<sub>2</sub>O do solo, durante o segundo período de avaliação, foi caracterizada em algumas datas e tratamentos com fluxos baixos e em outras

com fluxos elevados e que variaram em média 5,12 e 7,79  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  Para os tratamentos controles (CCP e CSP) respectivamente (Figura 18).

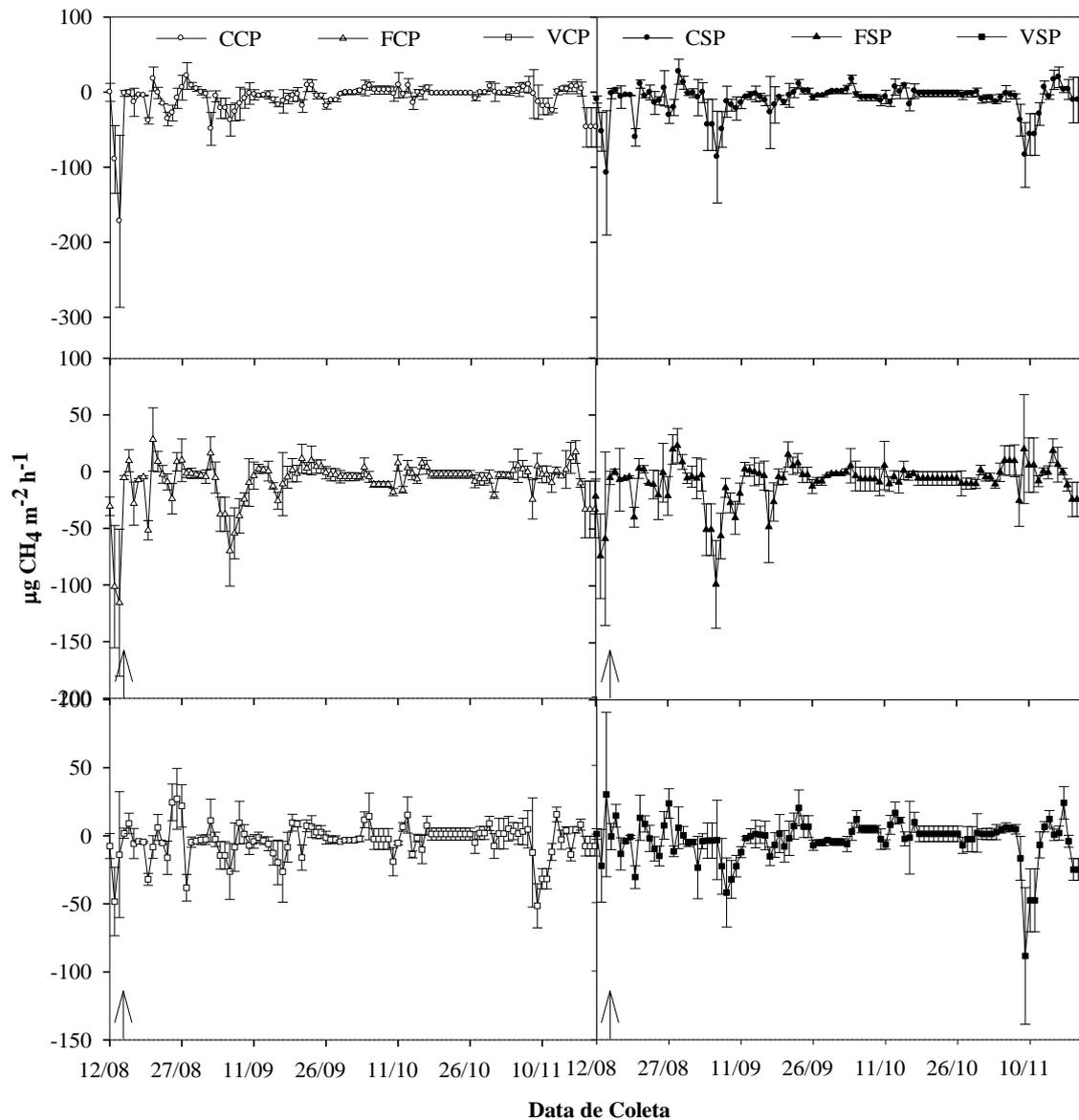
Com a adição de ureia na dose de 100 kg N  $\text{ha}^{-1}$  foi possível observar variações significativas entre os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  dos tratamentos FCP e FSP que elevaram a média dos fluxos para 16,25 e 10,93  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  respectivamente. Foi possível ainda observar que as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  provenientes da aplicação de ureia apresentam comportamento tardio e mais evidente 50 dias depois da aplicação e que é marcado pela maior concentração de chuva do mês de Outubro.

A adição de 160  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a 70 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ) resultou em um comportamento semelhante estatisticamente aos controles e com valores médios para VCP e VSP iguais a 8,10 e 8,32  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  respectivamente.

Os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  diários somados para o período de 107 dias resultaram em uma emissão total expressa em hectare de 125,40 e 190,76 g  $\text{N-N}_2\text{O ha}^{-1}$  (CCP e CSP) respectivamente. Para os tratamentos onde foram aplicados fertilizantes de 397,90 e 267,34 g  $\text{N-N}_2\text{O ha}^{-1}$  FCP e FSP respectivamente e vinhaça de 198,34 e 203,78 g  $\text{N-N}_2\text{O ha}^{-1}$  VCP e VSP, respectivamente.

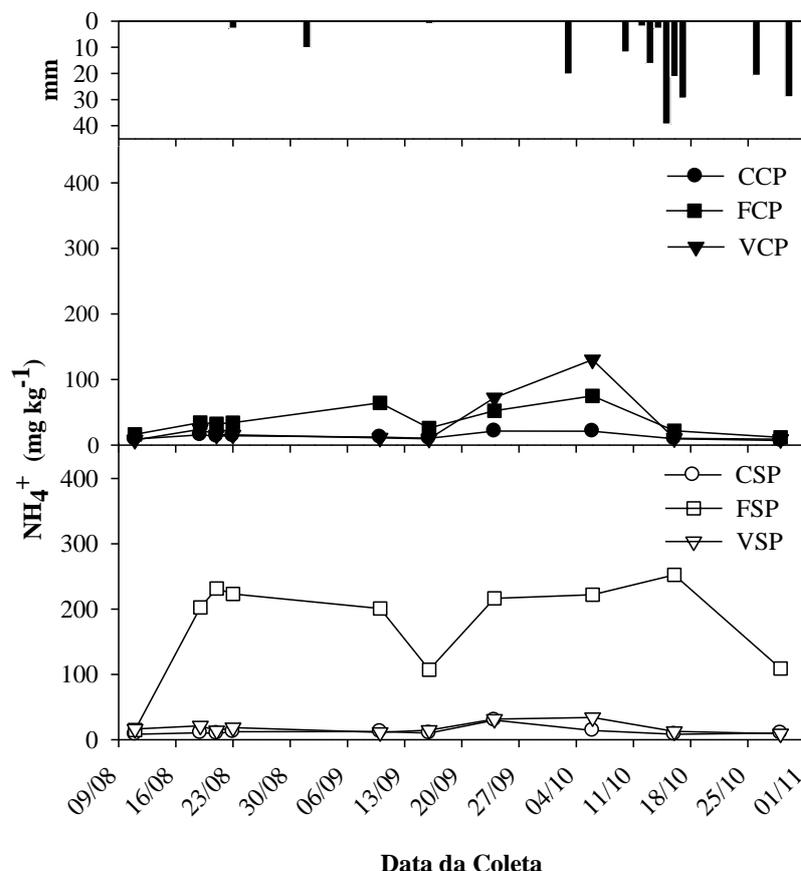
Durante o segundo período os fluxos de  $\text{CH}_4$  foram caracterizados, principalmente por absorção/oxidação independente da presença da palhada e em alguns poucos momentos por fluxos de emissões de pequena magnitude e estes marcados pela adição de vinhaça (Figura 19). A adição de 160  $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a 70 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ) resultou em diferença significativa dos fluxos de  $\text{CH}_4$  dos tratamentos onde ela foi aplicada e com valores médios mais elevados -3,53 e -4,71 VCP e VSP g  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  respectivamente, quando comparado com -8,25 e 10,38 g  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  respectivamente para CCP e CSP e -8,68 e -8,74 g  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  respectivamente para FSP e FCP.

Os fluxos de  $\text{C-CH}_4$  diários somados para o período de 107 dias resultaram em uma emissão total expressa em hectare de -841,79 e -1059,06 g  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (CCP e CSP) respectivamente. Para os tratamentos onde foram aplicados fertilizantes de -891,03 e -885,09 g  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (FCP e FSP) respectivamente, e vinhaça de -360,55 e -480,80  $\text{C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (VCP e VSP) respectivamente.



**Figura 19.** Fluxos médios diários de Metano ( $\text{CH}_4$ ) para os tratamentos avaliados durante o segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

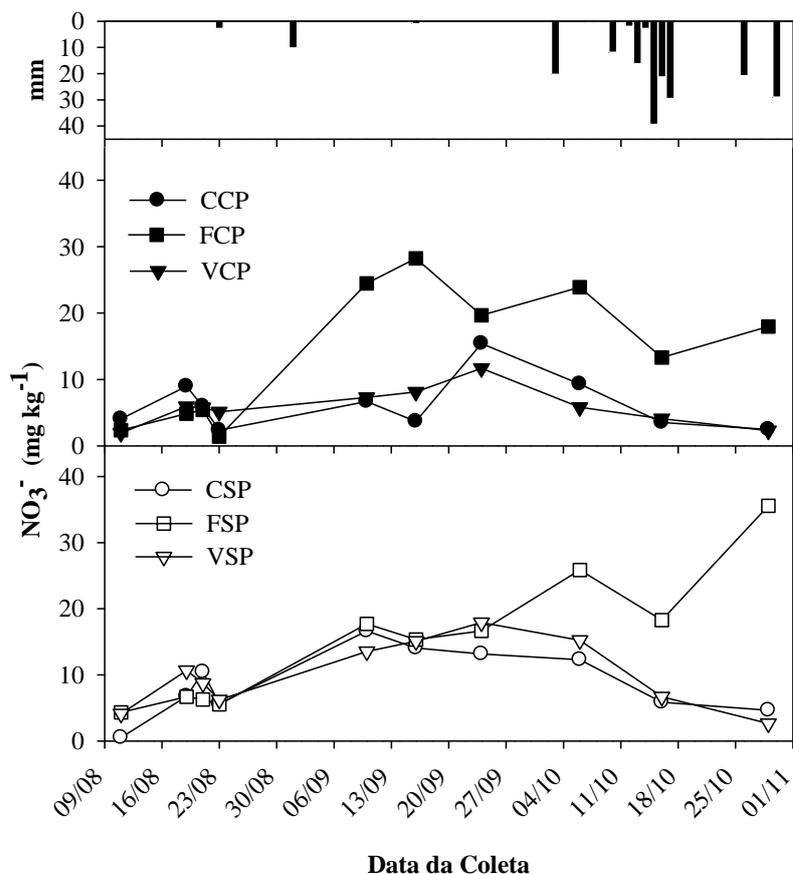
No segundo período logo depois da aplicação de fonte nitrogenada nos tratamentos foi possível observar uma maior concentração de N mineral na forma de  $\text{NH}_4^+$  no solo na camada 0-10 cm principalmente nos tratamentos onde foram adicionada ureia na dose de dose de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Figura 20).



**Figura 20.** Variação da concentração do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo (0-10 cm) segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

As concentrações de amônio aumentaram nos primeiros dias após a aplicação nos tratamentos com fertilizante e permaneceram elevadas até final das avaliações e as concentrações médias entre os tratamentos foram ao longo dos 107 dias de avaliação correspondentes a 13,43 e 12,57  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente, 30,53 e 18,28  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente e 36,82 e 178,02  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente. O elevado valor da concentração de  $\text{NH}_4^+$  no tratamento FSP o fez diferenciar estatisticamente dos outros tratamentos (Tukey;  $p \geq 0,05$ ).

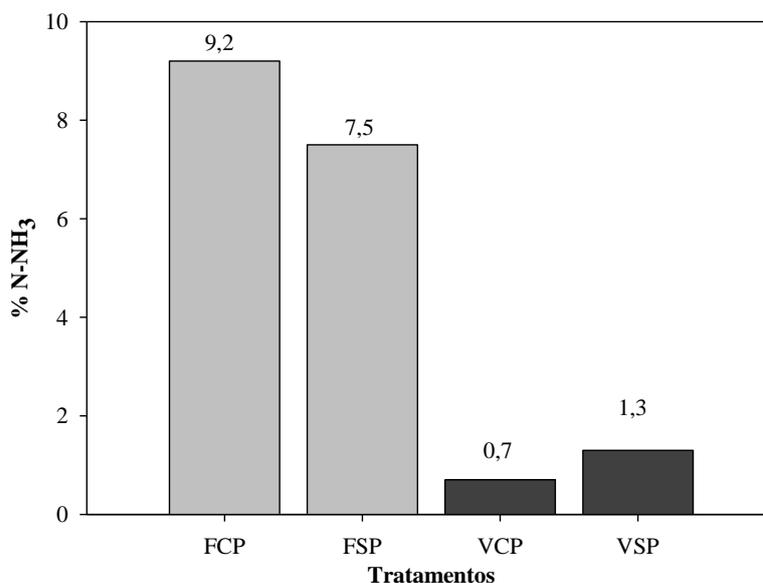
As concentrações de nitrato aumentaram durante o segundo período com o decorrer do tempo e diferenciou os tratamentos estatisticamente sendo possível observar concentrações médias mais elevadas nos tratamentos FSP e FCP, 15,23 e 14,16  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  respectivamente. Diferenciaram estatisticamente dos tratamentos VSP e CSP, 10,09 e 9,00  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  respectivamente e estes diferenciaram estatisticamente dos tratamentos VCP e CCP, 5,81 e 5,79  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  respectivamente.



**Figura 21.** Variação da concentração do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo (0-10 cm) segundo período de 12/08/2011 a 20/11/2011. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Durante o segundo período as perdas por volatilização de amônia ( $\text{N-NH}_3$ ) variaram em função das fontes de N. A utilização de ureia na dose  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  resultaram em maiores perdas quando comparada a aplicação  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

Quando da utilização da ureia o tratamento onde a palha foi mantida (FCP) apresentou perda de 9,2 %, e no tratamento sem a presença da palha (FSP) a perda foi de 7,5%. Essas perdas foram maiores quando comparada com o a aplicação de vinhaça, a qual perdeu 1,3% e 0,7% nas formas de VSP e VCP respectivamente (Figura 22).

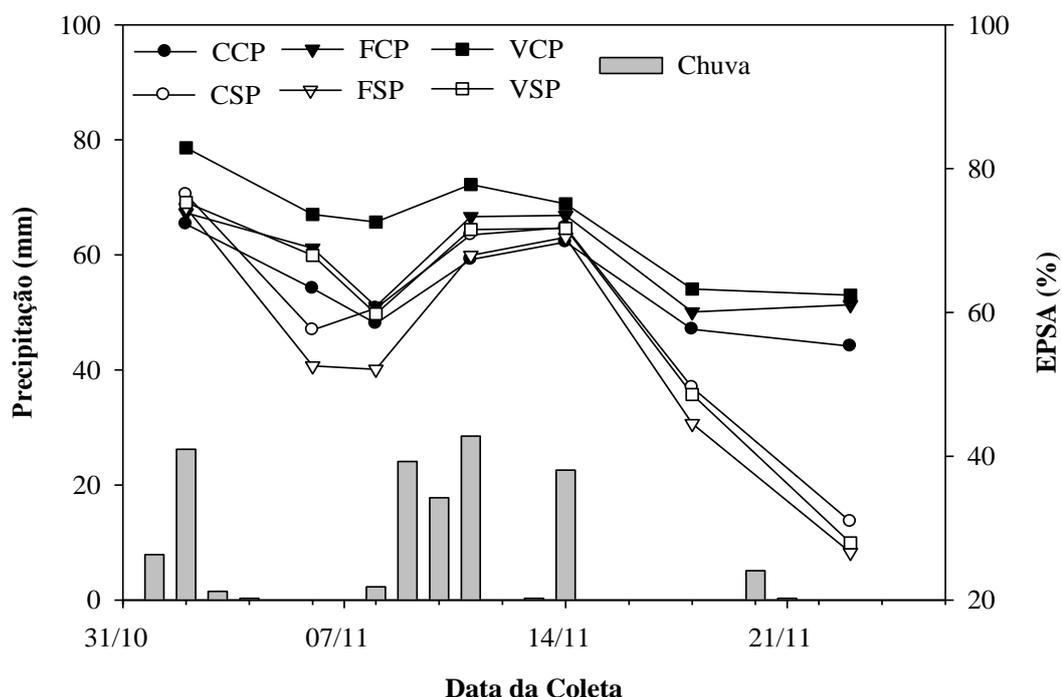


**Figura 22.** Perdas por volatilização de amônia período de 12/08/2011 a 20/11/2011. FSP: Fertilizante sem palha; FCP: Fertilizante com palha; VSP: Vinhaça sem palha; VCP: vinhaça com palha.

#### 4.5.3. Avaliações do terceiro período ano 2012

Para o terceiro período de estudo iniciado no dia 01 de Novembro de 2012 e finalizado no dia 23 de Novembro de 2012, a temperatura média do ar foi de 24,5 °C, com extremos oscilando entre 14,5 a 37,5 °C, e durante o período ocorreram 12 eventos de chuvas com total de precipitação nesse período de 136,9 mm. Entre os dias 08 e 11 de Novembro de 2012, o total de precipitação acumulado foi de 72,7 mm (Figura 23).

Os valores de densidade do solo variaram de 1,15 a 1,22 Mg.m<sup>-3</sup>, não diferindo estatisticamente entre os tratamentos (Tukey;  $p \geq 0,05$ ). O espaço poroso saturado com água (EPSA) na fase inicial do estabelecimento dos tratamentos e em função das chuvas, que ocorreram no dia anterior à amostragem de terra, variou independente da presença da palhada entre 72,26% e 82,90% (Figura 23).

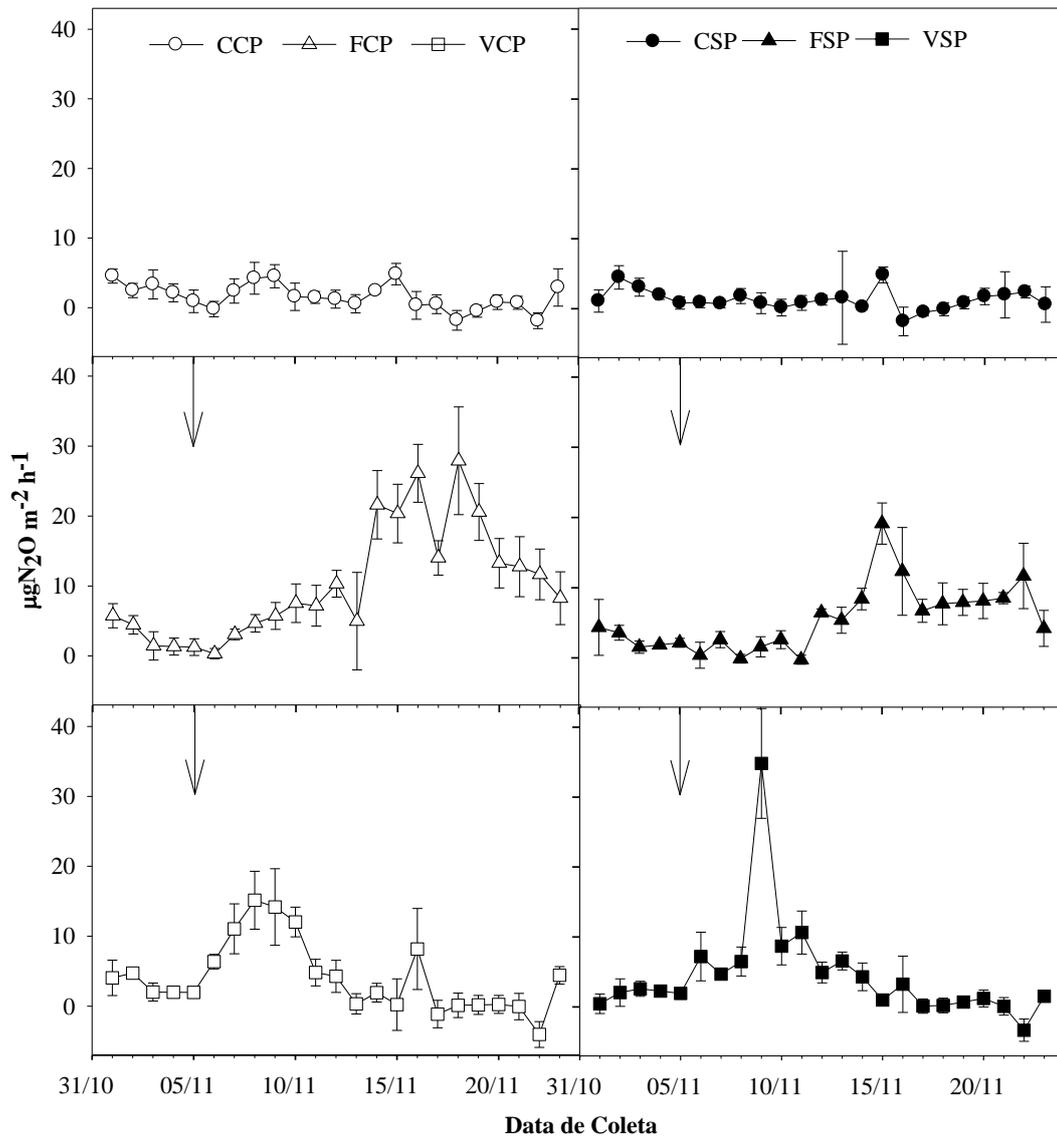


**Figura 23.** Distribuição da precipitação - ppt (mm) e porcentagem do espaço poroso saturado por água médio (EPSA), nos tratamentos avaliados no período de 01/11/2012 a 23/11/2012. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Ao longo da primeira semana quando as chuvas cessaram o EPSA diminuiu rapidamente nas áreas sem a presença da palhada para valores em torno de 58,0%. E com as chuvas que ocorreram no início da segunda semana os valores EPSA elevaram-se para todos os tratamentos para 71,0%. No entanto no final da terceira semana quando novamente as chuvas cessaram o EPSA diminuiu consideravelmente nas áreas onde a palhada foi retirada ( $20,63 \pm 2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). E os valores calculados para cada tratamento foram 26,60%, 27,74% e 30,90% respectivamente para VSP, FSP e CSP e de 55,30%, 61,06% e 62,39% respectivamente para CCP, FCP e VCP.

Os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo, durante o terceiro período variaram em média 6,80 e 5,35  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente. A adição de fertilizante proporcionou fluxos significativos e que variaram 42,49 e 22,96  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente, e para os tratamentos onde a vinhaça foi adicionada os fluxos variaram 16,83 e 18,52  $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  para VCP e VSP, respectivamente.

Os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  diários somados para o período de 23 dias resultaram em uma emissão total expressa em hectare de 37,56 e 29,53  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente para os tratamentos com e sem palha. Para os tratamentos onde foram aplicados os fertilizantes, as emissões foram de 234,58 e 126,78  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente para os tratamentos com e sem palha, e onde se aplicou a vinhaça, as emissões foram de 92,94 e 102,23  $\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente para os tratamentos com e sem palha.

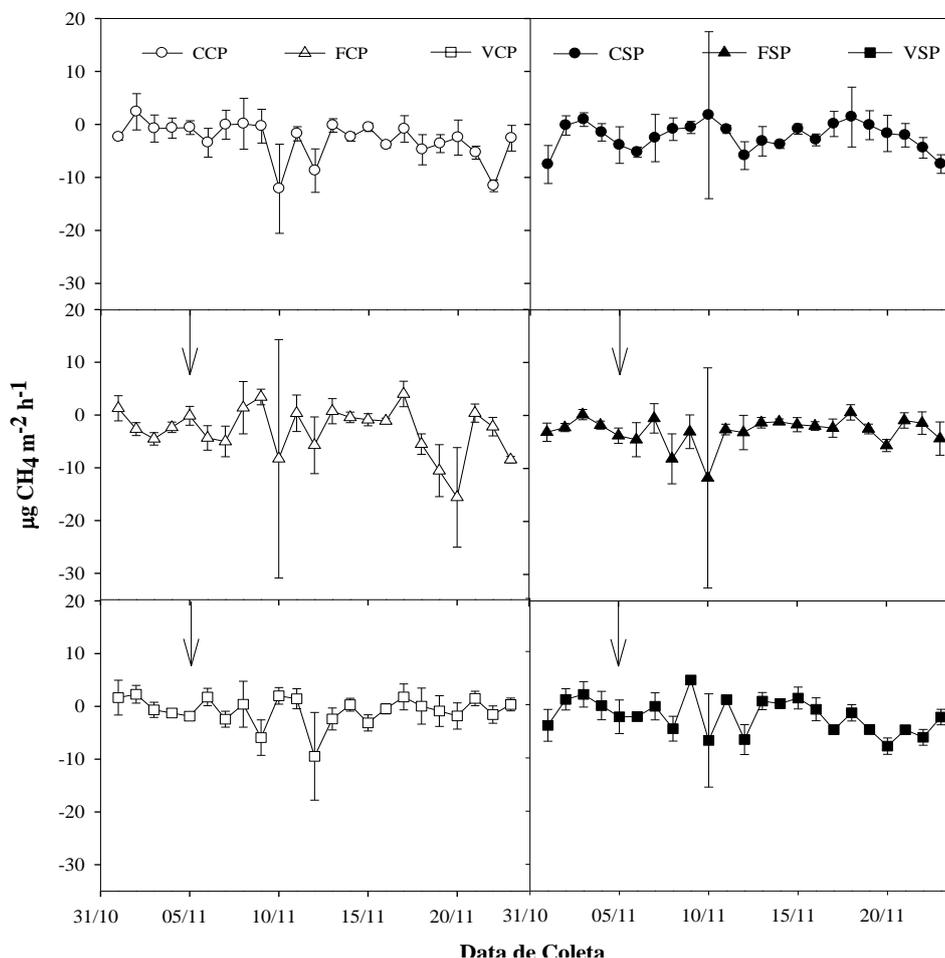


**Figura 24.** Fluxos médios diários de Óxido nitroso ( $N_2O$ ) para os tratamentos avaliados durante o terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Durante o terceiro período os fluxos de  $CH_4$  foram caracterizados, principalmente por absorção/oxidação independente da presença da palhada e em alguns poucos momentos por fluxos de emissões de pequena magnitude e estes marcados pela adição de vinhaça (Figura 25). A adição de  $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) não resultou em diferença significativa dos fluxos de  $CH_4$  dos tratamentos onde ela foi aplicada os valores médios encontrados foram  $-0,79$  e  $-2,11 \text{ mg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  VCP e VSP respectivamente,  $-2,89$  e  $-2,24 \text{ mg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  respectivamente para CCP e CSP e  $-2,88$  e  $-2,96 \text{ mg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  respectivamente para FCP e FSP.

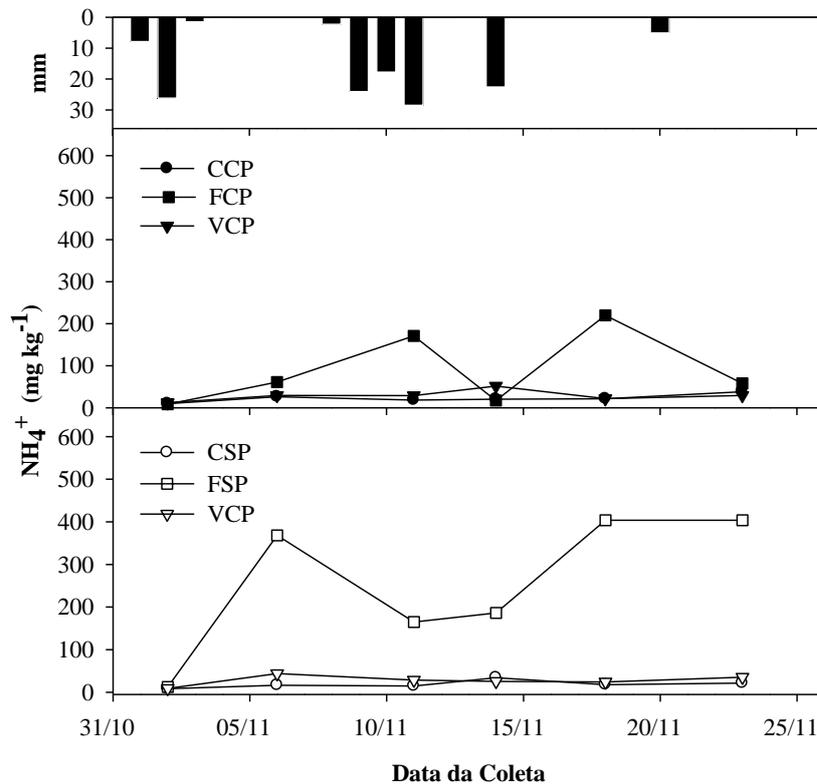
Os fluxos de  $CH_4$  diários somados para o período de 23 dias no tratamento controle resultaram em um consumo total expresso em hectare de  $-66,67$  e  $-51,67 \text{ mg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente para os tratamentos com e sem palha. Para os tratamentos onde foram

aplicados fertilizantes, os valores foram de -66,28 e -68,29 g C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, respectivamente para as áreas com e sem palha, e onde se aplicou vinhaça, de -18,39 e -48,55 C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, respectivamente para os tratamentos com e sem palha.



**Figura 25.** Fluxos médios diários de metano (CH<sub>4</sub>) para os tratamentos avaliados durante o terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. As barras em cada ponto representam o erro padrão da média. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

A semelhança do que ocorreu nos dois períodos anteriores a aplicação das fontes nitrogenadas elevou as concentrações de N mineral no solo na camada de 0-10 cm, sendo possível observar uma maior concentração de N mineral na forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Principalmente nos tratamentos onde foram adicionada ureia na dose de 100 kg N ha<sup>-1</sup> (Figura 26).

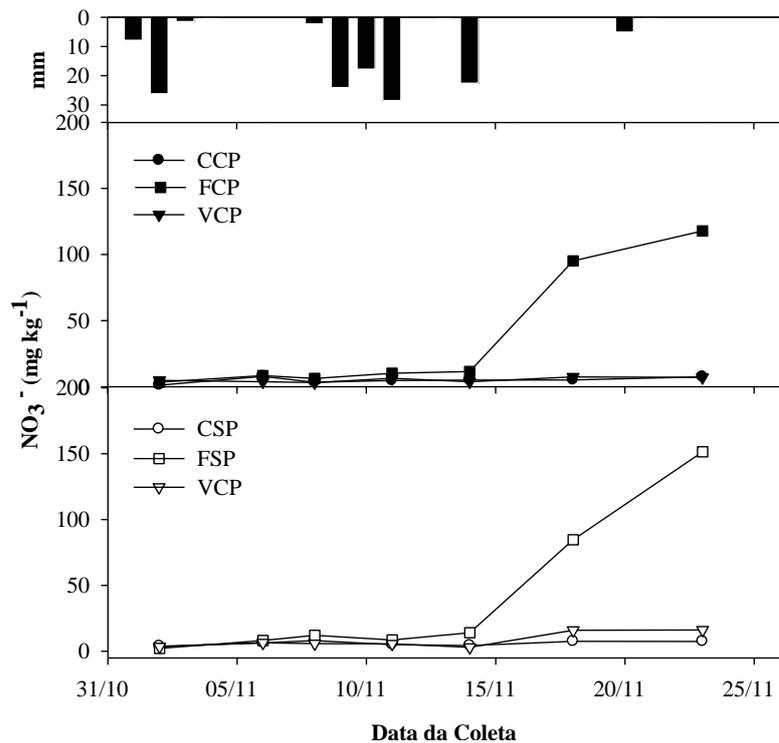


**Figura 26.** Variação da concentração do amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo (0-10 cm) terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

As concentrações médias de amônio do solo entre os tratamentos foram, ao longo dos 23 dias de avaliação, correspondentes a 23,88 e 32,27  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  para CCP e CSP, respectivamente. Onde foi realizada a aplicação de vinhaça, as concentrações foram de 30,00 e 31,26  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$ , com ou sem a presença da palha, respectivamente, e de 99,48 e 310,0  $\text{mg NH}_4^+ \text{kg}^{-1}$  onde aplicou o fertilizante, respectivamente para os tratamentos com e sem palha. O elevado valor da concentração de  $\text{NH}_4^+$  no tratamento FSP diferenciou estatisticamente dos outros tratamentos (Tukey;  $p \geq 0,05$ ).

As concentrações de nitrato durante o mesmo período de estudo permaneceram em níveis baixos durante o transcorrer das avaliações, elevando-se próximo do final das avaliações, sendo esse comportamento evidenciado em alguns dos tratamentos, exceto entre CCP e VCP, que permaneceram constantes ao longo do tempo (Figura 27).

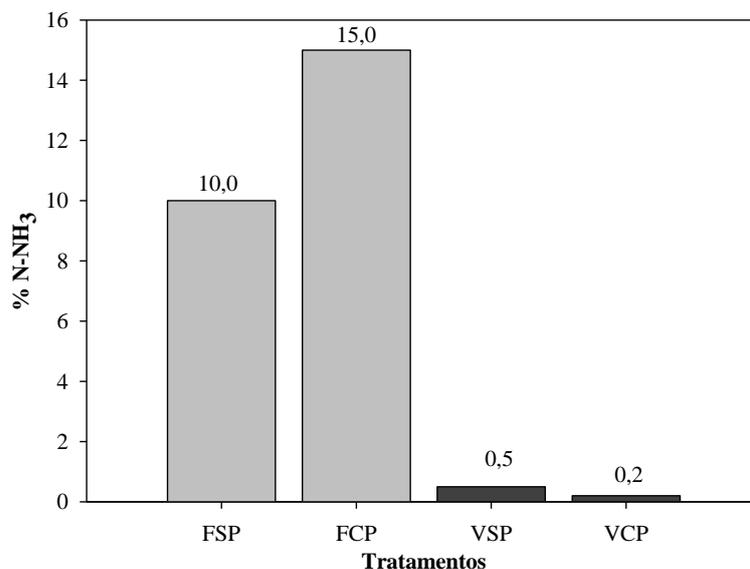
As concentrações médias entre os tratamentos foram ao longo dos 23 dias de avaliações correspondentes a 36,10 e 40,19  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  para FCP e FSP respectivamente, e que diferenciaram estatisticamente (Tukey;  $p \geq 0,05$ ) do controle (4,93 e 6,10  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  para CCP e CSP respectivamente) e do tratamento com vinhaça (5,18 e 8,05  $\text{mg NO}_3^- \text{kg}^{-1}$  para VCP e VSP respectivamente).



**Figura 27.** Variação da concentração do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo (0-10 cm) terceiro período de 01/11/2012 a 23/11/2012. CSP: Controle sem palha; FSP: Fertilizante sem palha; VSP: Vinhaça sem palha; CCP: Controle com palha; FCP: Fertilizante com palha; VCP: vinhaça com palha.

Durante o terceiro período as perdas por volatilização de amônia ( $\text{N-NH}_3$ ) variaram em função das fontes de N. A utilização de ureia na dose de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  resultaram em maiores perdas quando comparada a aplicação  $160 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça (equivalente a  $108 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

Quando da utilização da ureia o tratamento onde a palha foi mantida (FCP) apresentou perda de 15,0 % e tratamento sem a presença da palha (FSP) a perda foi de 10 %. Essas perdas foram maiores quando comparada com o a aplicação de vinhaça a qual perdeu 0,5 % e 0,2 % nas formas de VSP e VCP respectivamente (Figura 28).



**Figura 28.** Perdas por volatilização de amônia período de 01/11/2012 a 23/11/2012. FSP: Fertilizante sem palha; FCP: Fertilizante com palha; VSP: Vinhaça sem palha; VCP: vinhaça com palha.

#### 4.5.4. Balanço de gases de efeito estufa

Diante dos resultados obtidos com os fluxos das emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foi possível realizar o balanço de GEE da etapa agrícola da produção da cana-de-açúcar considerando os fatores de emissão obtidos após aplicação de vinhaça e adubação com ureia, com e sem a presença da palhada sobre o solo após a colheita.

As emissões de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> descritas por Soares et al. (2009), considerando-se somente a fase agrícola de produção da cana-de-açúcar, denominada “manejo da cultura” (Tabela 6), são originadas da vinhaça e do fertilizante aplicados ao solo. O cenário utilizado pelos autores compreendia a aplicação de vinhaça na dose de 80 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, que continha o equivalente a 20 kg N ha<sup>-1</sup>, e adubação com ureia na dose de 57 kg N ha<sup>-1</sup>. Os cálculos consideraram que 60% da área eram colhidas manualmente após a queima da palha, sendo os 40% restantes colhidos de forma mecanizada sem a queima. As emissões originadas da queima foram alocadas na etapa “colheita”. As emissões do solo corresponderam a 422,6 kg CO<sub>2</sub>eq (equivalentes de CO<sub>2</sub>) por hectare, tendo sido calculadas por Soares et al. (2009) utilizando a guia metodológica do IPCC (2006), Tier 1. Tal como consta na Tabela 6, esse resultado contribuiu para que a soma da emissão total de GEE fóssil mais a ocorrida do solo pelo uso de insumos, como o fertilizante, e também da vinhaça, somaram 3.244,1 kg CO<sub>2</sub>eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Para balanço de gases aqui proposto os fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> medidos no campo, em função do uso de vinhaça e fertilizante nitrogenado, foram integrados ao longo do ano, e as emissões ou drenos por hectare foram calculados (Tabela 7).

As emissões, ou drenos, de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O foram analisados considerando-se os anos de avaliação e a cobertura do solo como fatores, não sendo observada interação dos mesmos. A presença ou ausência da palha não repercutiu em diferenças nas emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, porém foi significativo o efeito do ano (Tabela 7). O ano de 2012 foi o que apresentou os maiores fluxos de N<sub>2</sub>O e de CH<sub>4</sub>. Em 2010 foram observados, independente da presença de palha, os menores fluxos de N<sub>2</sub>O e nesse ano não foram avaliados fluxos de metano.

**Tabela 6.** Emissões realizadas e emissões evitadas de gases de efeito estufa, GEE (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>) durante as etapas de produção e distribuição de etanol de cana-de-açúcar (SOARES et al., 2009).

Etapa de produção	Gás estufa emitido (por ha)			
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> eq. <sup>a</sup>
	g de CH <sub>4</sub> ou N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	
Plantio da cana <sup>b</sup>	+ 8,9	+ 1,8	+ 718,0	+ 719,1
Manejo da cultura <sup>c</sup>	+ 2,7	+ 1.362,9	+ 86,9	+ 509,5
colheita <sup>d</sup>	+ 17.017,1	+ 631,4	+ 315,0	+ 1.493,5
Produção de etanol <sup>e</sup>	+ 3.413,3	---	+ 107,6	+ 304,7
Distribuição do etanol <sup>f</sup>	---	---	---	+217,3
	Emissão total de GEE fóssil			+ 3.244,1
Uso combustível do etanol <sup>g</sup>	---	---	- 9.580,6	- 9.580,6

<sup>a</sup> Cada unidade de massa de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> é considerado como equivalente a 310 e 21 unidades de massa de CO<sub>2</sub>, respectivamente (IPCC, 2006). Valores positivos se referem a emissões, valores negativos se referem a emissões evitadas.

<sup>b</sup> Maquinário e diesel (50% do total), transporte, mão-de-obra (20% total), herbicidas, calagem, fertilização, e operações de plantio.

<sup>c</sup> Maquinário e diesel (10% do total), mão-de-obra (20% total), inseticidas, irrigação e emissões do solo derivadas do fertilizante e da vinhaça (80 m<sup>-3</sup> ha<sup>-1</sup>).

<sup>d</sup> Maquinário e diesel (40% do total), mão-de-obra (60% total), emissões de resíduos após queima da palhada para colheita de 60% da área e transporte.

<sup>e</sup> Instalações da usina, destilaria, processamento e emissão de CH<sub>4</sub> da vinhaça nos canais de distribuição, assumindo-se que 0,2% do C existente na vinhaça (~16 kg m<sup>-3</sup>) se reduzem à CH<sub>4</sub>.

<sup>f</sup> Assumindo uma distância média de 500 km entre as usinas e postos de combustível, via distribuidores.

<sup>g</sup> Assumindo que o etanol (teor de C de 52%) é completamente queimado.

As diferenças entre os anos são fruto da incerteza associada ao clima, e neste caso, os valores médios de três anos resulta em índices de emissão mais representativos.

As emissões médias de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram expressas em equivalentes de CO<sub>2</sub> para que os cálculos de balanço de GEE realizados por Soares et al. (2009) fossem atualizados, mais especificamente no que se consideraram emissões desses gases no manejo da cultura da cana-de-açúcar. Quando realizadas as ponderações, referentes às aplicações de fertilizante e vinhaça obteve-se o valor correspondente da emissão de GEE de 220,6 kg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, 52 % da emissão calculada com a metodologia do IPCC (1996). Esse resultado correspondeu para que a soma da emissão total de GEE na produção de etanol reduzisse para 2955,21 kg CO<sub>2</sub>eq. ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 7).

**Tabela 7.** Emissões e drenos de gases de efeito estufa, GEE (N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>) durante fase de produção de cana-de-açúcar.

Fonte de N	Ano	Gás estufa emitido (por ha)							
		CH <sub>4</sub>			N <sub>2</sub> O			CO <sub>2</sub> eq. <sup>a</sup>	
		SP	CP	média	SP	CP	média	SP	CP
	kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>			g N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>			kg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>		
Ureia	2010	----	----		0,557	0,527	0,542C		
	2011	0,833	-0,249	0,292	0,385	1,233	0,809B	1,49	2,71
	2012	0,010	0,493	0,252	2,425	4,913	3,669A		
	média	0,421	0,122		1,405	3,073			
Vinhaça	2010	----	----		0,527	0,466	0,497B		
	2011	2,783	2,282	2,532A	-0,033	0,308	0,137B	1,06	1,05
	2012	0,066	1,022	0,544B	1,813	1,381	1,597A		
	média	1,425	1,652		0,890	0,844			

<sup>a</sup> Cada unidade de massa de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> é considerado como equivalente a 310 and 21 unidades de massa de CO<sub>2</sub>, respectivamente (IPCC, 2006). Valores positivos se referem a emissões, valores negativos se referem a emissões evitadas. SP – Sem palha, CP – Com palha. Cada unidade de massa de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> é considerada como equivalentes a 310 e 21 unidades de massa de CO<sub>2</sub>, respectivamente (IPCC, 2006).

Letras minúsculas referem-se a comparações num mesmo ano e letras maiúsculas a comparações entre anos diferentes.

#### 4.6. DISCUSSÃO

A dinâmica de formação e emissão dos GEE determinados pelos processos microbianos resulta de interações complexas entre diversos fatores físicos, químicos e biológicos como temperatura, textura, estrutura e pH do solo, disponibilidade de N, de material orgânico degradável e do conteúdo de água do solo (BOCKMAN; OLFS, 2008).

As práticas de manejos adotadas, a rotação de culturas, preparo do solo, formas, doses e períodos de aplicação dos fertilizantes nitrogenados também exercem fortes efeitos sobre as dinâmicas dos principais GEE (TAN et al., 2009; SIGNOR, 2010). As interações significativas entre os diversos fatores indicam a existência de processos sinérgicos. Dentre estes fatores, o aumento da umidade do solo proporciona altos fluxos de N<sub>2</sub>O, e geralmente os altos fluxos desse gás ocorrem após períodos de aplicação de fertilizantes ou resíduos orgânicos (DICK et al., 2001; NOVOA; TEJEDA, 2006).

Na região de Ribeirão Preto a precipitação média anual é de 1422,5 mm (CEPAGRI, 2013), sendo os meses de junho até agosto marcado como de menor intensidade de chuva, enquanto de setembro até novembro as chuvas são mais intensas; de dezembro até fevereiro ocorrem os maiores volumes de chuva (Figura 9).

Os eventos de chuvas que ocorreram durante os três períodos de coleta de gases foram responsáveis por variações no EPSA, os quais variaram em função da presença ou retirada da palhada da área experimental. Os valores de EPSA na faixa em que oscilaram são considerados favoráveis às emissões (DOBBIE; SMITH, 2003), principalmente nas áreas onde a palhada foi mantida, com EPSA variando entre 50 e 80% nas épocas de amostragem (Tabela 8).

Outro fator condicionante dos fluxos de gases é a temperatura, que exerce influência na magnitude dos fluxos de N<sub>2</sub>O, mas somente se torna limitante quando está muito baixa, interferindo diretamente nos processos bioquímicos, limitando a atividade da microbiota no solo (DAVIDSON et al., 2006). A temperatura média durante os três períodos foi de 24,5°C condição favorável aos fluxos.

**Tabela 8.** Variação de temperatura, chuva e EPSA em relação ao ano de avaliação.

Ano	Dias	T (°C)	PPT (mm)	EPSA (%)
2010	54	25,5	150,4	CP-70-80
				SP-60-80
2011	107	23,3	304,0	CP-80-90
				SP-60-80
2012	23	24,5	136,9	CP-50-60
				SP-20-30

CP – área com palhada; CS – área sem palhada.

A variação temporal da produção de N<sub>2</sub>O durante os três períodos de avaliação foi caracterizada por fluxos que variaram em média entre 5,12 a 42,49 µg N- N<sub>2</sub>O m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>. Os menores fluxos estão relacionados ao tratamento controle. Nos tratamentos onde foi aplicada vinhaça, os fluxos foram menores comparados aos tratamentos onde foi utilizada ureia, exceto no primeiro período quando a dose de ureia utilizada foi de 52 kg N ha<sup>-1</sup> e a dose de vinhaça foi de 160 m<sup>-3</sup> ha<sup>-1</sup> (59 kg N ha<sup>-1</sup>), não havendo diferença estatística entre as fontes de N em relação aos fatores de emissão (Tabela 9). Porém quando a ureia foi utilizada na dose de 100 kg N ha<sup>-1</sup> emissões significativas de N<sub>2</sub>O foram observadas, repercutindo em fatores de emissão mais altos (Tabela 9).

**Tabela 9.** Fluxos de N-N<sub>2</sub>O médios e total ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e dose de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) em 2010.

Tratamento	Ano 2010			
	Fluxo médio	Fluxo total	Dose N	Fator emissão
CCP	6,53	254,69		
CSP	6,65	259,61		
FCP	8,17	318,64	52	0,0002
FSP	7,37	287,49	52	0,0001
VCP	8,43	329,00	59	0,0005
VSP	8,53	332,87	59	0,0005

CCP: Controle com palha; CSP: Controle sem palha; FCP: Fertilizante com palha; FSP: Fertilizante sem palha; VCP: vinhaça com palha; VSP: Vinhaça sem palha.

Nas áreas onde o fertilizante foi utilizado com a presença da palhada os fluxos de N<sub>2</sub>O foram mais elevados, concordando com o observado por Carmo et al. (2012), também em solos de São Paulo, sendo o efeito significativo observado no terceiro período. A palhada resulta em um ambiente favorável a mineralização de N, principalmente por manter o solo mais úmido, favorecendo o processo de desnitrificação e conseqüentemente a produção de N<sub>2</sub>O (DOBBIE; SMITH, 2003). A presença da palhada também contribui para aumentar a atividade biológica da superfície do solo, consumindo o oxigênio disponível, e intensificando a zona de anaerobiose (BAGGS et al., 2006).

**Tabela 10.** Fluxos de N-N<sub>2</sub>O médios e total ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^2 \text{ h}^{-1}$ ) e dose de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) em 2011.

Tratamento	Ano 2011			
	Fluxo médio	Fluxo total	Dose N	Fator emissão
CCP	5,12	522,51		
CSP	7,79	794,84		
FCP	16,25	1657,89	100	0,0043
FSP	10,93	1115,21	100	0,0012
VCP	8,10	826,42	70	0,0016
VSP	8,32	849,09	70	0,0003

CCP: Controle com palha; CSP: Controle sem palha; FCP: Fertilizante com palha; FSP: Fertilizante sem palha; VCP: vinhaça com palha; VSP: Vinhaça sem palha.

A aplicação de vinhaça na dose utilizada resultou em aumento real de emissão de N<sub>2</sub>O em relação aos controles, porém não estatisticamente significativos, e que podem ser atribuídos à composição da vinhaça e as doses aplicadas, que normalmente refletem em baixa quantidade de N adicionada. Mesmo havendo emissão de N<sub>2</sub>O, a variabilidade espacial associada ao processo dificulta a diferenciação de pequenos fluxos do gás.

Os fluxos de N<sub>2</sub>O provenientes da aplicação da vinhaça foram potencializados a partir do dia seguinte após a aplicação e isto ocorreu devido à alta saturação do solo com a vinhaça que favoreceu o processo de desnitrificação devido à limitação de O<sub>2</sub> (JANTALIA et al., 2006). Outro aspecto que contribuiu para aumento dos fluxos foi à adição de fonte de carbono prontamente mineralizável que também estimula as taxas de desnitrificação do solo, por aumentar a atividade microbiana e interferir na dinâmica do nitrogênio.

**Tabela 11.** Fluxos de N-N<sub>2</sub>O médios e total ( $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e dose de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) em 2012.

Tratamento	Ano 2012			
	Fluxo médio	Fluxo total	Dose N	Fator emissão
CCP	6,80	156,50		
CSP	5,35	123,06		
FCP	42,49	977,45	100	0,0031
FSP	22,96	528,25	100	0,0015
VCP	16,83	387,28	108	0,0008
VSP	18,52	425,98	108	0,0011

CCP: Controle com palha; CSP: Controle sem palha; FCP: Fertilizante com palha; FSP: Fertilizante sem palha; VCP: vinhaça com palha; VSP: Vinhaça sem palha.

Oliveira, (2010) comenta que as maiores emissões de N<sub>2</sub>O nos primeiros cinco dias de avaliação, estão associadas ao aporte de N e às condições de anaerobiose do solo, devido à aplicação de vinhaça. Em condições de anaerobiose, o processo de desnitrificação ocasiona a conversão de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> em N<sub>2</sub>O através da atividade de microrganismos.

Os fluxos de N<sub>2</sub>O provenientes da aplicação da ureia tiveram um comportamento mais tardio, com os fluxos mais elevados sendo observados entre 08 a 15 dias após a aplicação da ureia. Esse resultado difere dos encontrados nos estudos realizados por Bremner e Blakmer (1978) onde os maiores fluxos de N<sub>2</sub>O do solo fertilizado foram encontrados nas primeiras duas semanas, sendo os valores obtidos a partir da terceira semana muito próxima ao do solo não fertilizado.

Enquanto emissões de N<sub>2</sub>O foram observadas com a aplicação de vinhaça e ureia, os fluxos de CH<sub>4</sub> foram negativos, indicando o predomínio de metanotrofia (Tabelas 12 e 13).

**Tabela 12.** Fluxos de C-CH<sub>4</sub> médios e total ( $\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e dose de N aplicada ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) em 2011.

Tratamento	Ano 2011		
	Fluxo médio	Fluxo total	Dose
CCP	-12,98	-1323,9	
CSP	-13,84	-1412,07	
FCP	-11,64	-1188,03	100
FSP	-11,57	-1180,12	100
VCP	-4,71	-480,73	70
VSP	-6,28	-641,07	70

CCP: Controle com palha; CSP: Controle sem palha; FCP: Fertilizante com palha; FSP: Fertilizante sem palha; VCP: vinhaça com palha; VSP: Vinhaça sem palha.

Oliveira, (2010) encontrou fluxos negativos de CH<sub>4</sub> e relata que os mecanismos envolvidos podem ser atribuídos a oxidação de alta afinidade e oxidação de baixa afinidade, o primeiro ocorrendo quando as concentrações de CH<sub>4</sub> equivalem as da atmosfera e podem ser encontradas em solos com baixas concentrações de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; e a segunda quando as concentrações de CH<sub>4</sub> estão acima de 40 ppm e que o mecanismo é mediado por bactérias metanotróficas. Para Pes (2009), os fluxos negativos de CH<sub>4</sub> podem estar relacionados com a diminuição do EPSA durante os dias de estiagem, e que associado à aeração do solo proporciona a capacidade de absorção de CH<sub>4</sub> atmosférico.

**Tabela 13.** Fluxos de C-CH<sub>4</sub> médios e total (g C-CH<sub>4</sub> m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) e dose de N aplicada (kg N ha<sup>-1</sup>) em 2012.

Tratamento	Ano 2012		
	Fluxo médio	Fluxo total	Dose de N
CCP	-4,14	-95,26	
CSP	-3,38	-77,77	
FCP	-3,84	-88,37	100
FSP	-3,26	-75,06	100
VCP	-1,06	-24,52	108
VSP	-2,81	-64,73	108

CCP: Controle com palha; CSP: Controle sem palha; FCP: Fertilizante com palha; FSP: Fertilizante sem palha; VCP: vinhaça com palha; VSP: Vinhaça sem palha.

Com relação as perda de N por volatilização de NH<sub>3</sub> os valores mais elevados ocorreram durante o primeiro período e nos tratamentos onde a ureia (52 kg N ha<sup>-1</sup>) foi aplicada, embora nos demais períodos o nível de perda não tenha sido muito discrepante. Essa faixa de perda de N pode ser considerada relativamente baixa, se comparado ao observado em outros estudos onde a ureia foi utilizada como fertilizante. Costa et al. (2003) encontraram perdas da ordem de 36 % do N aplicado quando a ureia foi aplicada em superfície. A umidade inicial do solo pode explicar parte do resultado. As perdas de NH<sub>3</sub> do solo são controladas por fatores como temperatura e umidade. Altas temperaturas favorecem a hidrólise da ureia, porém antes disso deve haver umidade suficiente para dissolução do fertilizante (CABRERA et al., 2010).

A umidade inicial do solo no primeiro ciclo de medições foi mais alta, e por isso as perdas forma maiores. No entanto, esperava-se que a presença da palha estimulasse as perdas por ter reservado mais a umidade do solo, o que não ocorreu. Neste caso, dois outros processos poderiam ser possíveis explicações (ALVES et al., 2012b): a) as perdas de NH<sub>3</sub> estão relacionadas com a secagem do solo, que faz com que o NH<sub>3</sub> em solução se concentre, havendo volatilização de NH<sub>3</sub> para a atmosfera de forma a manter o equilíbrio. O solo com palha perdeu menos umidade do que o solo onde a palha foi retirada; b) temperaturas mais altas implicam em maiores taxas de dissolução e hidrólise da ureia, fator que pode ter sido amenizado na área com palha.

A aplicação de vinhaça teve comportamento similar ao do fertilizante nitrogenado, quanto às perdas por volatilização de NH<sub>3</sub>, porém em magnitude muito menor, indicando que não seja um processo relevante de perda de N para essa fonte. Silva et al. (1999) atribuem as baixas perdas de N-NH<sub>3</sub> derivada da vinhaça à imobilização líquida do N da vinhaça pela microbiota, em resposta a adição da vinhaça e da palha, que apresenta elevada relação C/N.

A sustentabilidade ambiental de diferentes biocombustíveis tem sido avaliada por diversos indicadores, no que se refere à capacidade de mitigação de GEE, no entanto, tem sido comum em alguns estudos realizados fora do país de que o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar seja capaz mitigar as emissões de GEE.

Crutzen et al. (2008) sinaliza para uma subestimativa das emissões, quando se utiliza os fatores de emissão do IPCC e argumentam serem maiores os fatores de emissões em função principalmente das emissões direta e indiretas do N<sub>2</sub>O.

Garcia e Sperling (2010) afirmam que diferenças podem ocorrer devido ao fato de que a quantidade de insumos utilizados para produzir o etanol pode variar dependendo do cenário tecnológico em questão. Essas variações podem levar a diferentes resultados na quantificação das emissões. No entanto, vale afirmar que a tendência é de que sempre haverá mitigação expressiva de emissões de CO<sub>2</sub>eq.

#### 4.7. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados mostraram que a aplicação de uma fonte de N ao solo, seja fertilizante ureia ou a vinhaça, induz a perdas de N na forma de  $N_2O$ , cuja magnitude pode ser aumentada pela presença da palha.

Os fatores de emissão calculados para as três épocas de avaliação da fertilização com ureia variaram entre 0,01 a 0,4% da dose de N aplicada, dependendo da presença ou não de palha e do período considerado.

A aplicação de fertilizante ureia ou vinhaça resultou em fluxos negativos de  $CH_4$ .

As perdas por volatilização de  $NH_3$  tornam-se importantes somente para o fertilizante, sendo pouco expressiva para a vinhaça. A magnitude das perdas foi próxima de 10 %, igual ao valor *default* da guia metodológica do IPCC de 2006, porém sabe-se que é um processo muito variável e perdas mais significativas podem ocorrer dependendo das condições do ambiente local.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do solo com a cultura da cana-de-açúcar implica na manutenção dos estoques de C do solo caso o uso anterior tenha sido com pastagens de baixa produtividade. No entanto, o observado com o estudo foi que a área com cana-de-açúcar estabiliza os estoques de C do solo em níveis inferiores aos observados na área de floresta secundária.

O uso da fertilização nitrogenada induz a produção de  $N_2O$  do solo, assim como tende a ocorrer com a aplicação da vinhaça, e mesmo com a manutenção da palhada, os níveis de emissão são muito baixos e praticamente não afetariam de forma significativa os resultados dos balanços de gases de efeito estufa realizados para a cultura (SOARES et al., 2009), e que demonstram o benefício da substituição de combustíveis fósseis pelo etanol da cana-de-açúcar.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M.; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F.; SANTOS, H. P.; CARVALHO, C. J. R. **Emissões de óxido nítrico e óxido nítrico do solo em sistemas agrícolas**. In: Estoques de Carbono e a Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agropecuária Brasileira (LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. Eds.). DTI-Embrapa, Brasília, DF. p. 159-191. 2012a.
- ALVES, B. J. R.; SMITH, K. A.; RILNER, A. F.; CARDOSO, A. S.; OLIVEIRA, W. R. D.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N<sub>2</sub>O flux from soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 46, 129-135. 2012b.
- ALVES, B. J. R.; SANTOS, J. C. F.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta**. In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (Ed.). Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola. Brasília: Embrapa-SPI, (Embrapa-CNPAP. Documentos, 46), p. 409-449, 1994.
- AMARAL, W. A. N.; MARINHO, J. P.; TARASANTCHI, R.; BEBER, A.; GIULIANI, E. Environmental sustainability of sugarcane ethanol in Brazil in ZUUBIER, P.; VOOREN, J. **Sugar Ethanol - Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment** Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 252p. 2008.
- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes de 2011** São Paulo: ANDA, 152 p. 2011.
- ARAÚJO, E. S.; MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; SOARES, L. H. B; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.7, p.769-776, 2009.
- BAGGS, E. M.; CHEBIL, J.; NDUFA, J. K. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v 90, n1/2, p. 69-76, 2006.
- 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**, Madison, v. 85, p.1004-1008, 1993.
- BASSANTA, M. V. **Dinâmica do nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo de resíduos da colheita**. (Tese de Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 82p. 2004.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v39, n. 7, p. 677-683, 2004.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1473-1478, 2001.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistema de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 599-607, 2000.

BELIZÁRIO, M. H. **Mudança no estoque de carbono do solo devido ao uso agrícola da terra no sudoeste da Amazônia**. (Dissertação Mestrado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 93p. 2008.

BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; GERALDES, A. P. A.; FERNANDES, S. A. P. Soil carbon and nitrogen of a pasture-forest cronossequence in Paragominas, Pará, Brazil. **Scientia Agrícola**, 56: 1-11. 1999.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia, **Soil & Tillage Research** 55 p. 183-191. 2000.

BOCKMAN, O. C.; OLFS, H. W. Fertilizers, agronomy and N<sub>2</sub>O. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v.52, p.165-170, 1998.

BODDEY, R. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Bio-ethanol production in Brazil. In: Pimentel, D. (Ed.), **Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks**. Springer, New York, pp. 321-356. 2008.

BONDE, T. A.; CHRISTENSEN, B. T.; CERRI, C. C. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural <sup>13</sup>C abundance in particle size fractions of forested and cultivated oxisols. **Soil Biology and Biochemistry**, 24, 275-277. 1992.

BRADY, N. C.; WWEIL, R. R. **The nature and properties of soils**, 13<sup>th</sup>. Ed. Prentice Hall: Upper saddle River, p. 960. 2002.

BREMNER, J. M.; BLACKMER, A. M. Nitrous oxide: emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. **Science**, n.199, p. 295-296, 1978.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Effects of Forest clearing and succession on the carbon and nitrogen contents of soil in PortoRico and U.S. Virgen Islands. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.124, p.53-64, 1990.

CABRERA, M. L.; KISSEL, D. E.; CRAIG, J. R.; QAFOKU, N. P.; VAIO, N.; REMA, J. A.; MORRIS, L. A. Relative humidity controls ammonia loss from urea applied to loblolly pine. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, p. 543-549, 2010.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.9, p.1028-1035, set. 2010.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. (Tese Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 103p. 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**, Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBSS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. reações da matéria orgânica in SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais** 2ed. Porto Alegre Metropole 636p 2008.

CANTARELLA, H. MARCELINO, R. O uso de inibidor de urase para aumentar a eficiência da uréia 1º **Simpósio sobre Informações Recentes para Otimização da Produção Agrícola**. INPI, Piracicaba, 2006.

CANTARELLA, H. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados: Uso eficiente de nitrogênio em novos fertilizantes no Brasil. **Informações Agrônomicas** IPNI, n.120, p.12-13, 2007a.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C,L. (Ed.). Fertilidade do solo, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 375-470, 2007b.

CARMO, J. B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.; SOUSA NETO, E. R.; PITOMBO, L. M.; VARGAS, V. P.; ANDRADE, C. A.; GAVA, G. C.; ELIA NETO, A.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; DUARTE-NETO, P. J.; GAVA, G. J. C.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology. Bioenergy**, v. 5, p. 1-14, 2012.

CEPAGRI Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI). Ribeirão Preto. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Arquivo do original em 18 de junho de 2012. Página visitada em 20 de Janeiro de 2013.

CERRI, C.; FELLER, C.; BALESSENT, J.; VICTORIA, R.; PLENECASSEGNE, A. Application du trapege isotopique naturel en  $^{13}\text{C}$ , à réducte de la dynamique de la matiér organique dans lês sols. **C. R. Academie des Sciences**, Paris, v. 11, n. 9, p423-428, 1985.

CERRI, C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; FELLER, C.; Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: The case of Brazil. **Soil Use management**. 20, 248-254, 2004.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and opportunités of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. D. CERRI, C. E. P. (Ed) **Carbon sequestration in soils of Latin America** New York: The Haworth Press, v.1 p. 41-47, 2006.

CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 23-28, 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas – cana-de-açúcar**. Available at: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2>>. Accessed on 05 February. 2012.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, 32: 323-332. 2008.

- COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 631-637, 2003.
- CRUTZEN, P. J.; MOSIER, A. R.; SMITH, K. A. “N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels”, **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, pp.389-395, 2008.
- DAVIDSON, E. A.; MATSON, P. M.; VITOUSEK, R.; RILEY, R.; DUNKIN, K.; GARCIA-MENDEZ, G.; MAASS, J. M. Processes regulating soil emissions of NO and N<sub>2</sub>O in a seasonally dry tropical forest. **Ecology**, v. 74, p. 130-139, 1993.
- DAVIDSON, E. A.; KELLER, M.; ERICKSON, H. E.; VERCHOT, L. V.; VELDKAMP, E. Testing a conceptual model of soils emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, 50:667-680, 2000.
- DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A.; LUO, Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub>. **Global Change Biology**, v. 12, p 154–164, 2006.
- DICK, J.; SKIBA, U.; WILSON, J. The effect of rainfall on NO and N<sub>2</sub>O emissions from Ugandan agroforest soils. **Phyton-Annales Rei Botanicae**, 41:73–80, 2001.
- DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. **Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono**. Embrapa Instrumentação Agropecuária. São Carlos SP. Documentos; nº 12. 17p. 2004.
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v. 81, p. 87 – 95, 2005.
- DOBBIE, K. E.; SMITH, K. Impact of different forms of N fertilizer on NO emissions from intensive grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 67: 37–46, 2003.
- ELIAS, D. **Região de Ribeirão Preto (SP): o Brasil Agrícola Moderno**. GEOUSP, São Paulo: FFLCH/USP, Humanitas, nº 1, abril. p.73-83. 1997.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. Ed. Revista, Rio de Janeiro, 230 p, 2011.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 306 p, 2006.
- EPSTEIN, E; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspective**. 2a ed., Sinauer Associates, 400 p, 2005.
- EVANGELISTA, B. A. **Projeção de cenários atuais e futuros de produtividade de cana-de-açúcar em ambientes de Cerrado**. (Tese Doutorado) Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 188p. 2011.
- FARONI, C. E.; TRIVELLIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41, 1007-1013. 2006.
- FAVORETTO, C. M. **Caracterização da matéria orgânica humificada de um Latossolo Vermelho distrófico através da espectroscopia de fluorescência induzida por laser**. (Dissertação Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa. 2007. 96p.
- FELLER, C.; BEARE, M.H., Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, 79, 69-116, 1997.

FELLER, C.; ALBRECHT, A.; BLANCHART, E.; CABIDOCHÉ, Y. M.; CHEVALLIER, T.; HARTMANN, C.; ESCHENBRENNER, V.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; NDANDOU, J. F. Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 61, 19-31, 2001.

FISCHER, G.; TEIXEIRA, E.; HIZSNYIK, E. T.; VELTHUIZEN, H. **Land use dynamics and sugarcane production.** in ZUUBIER, P.; VOOREN, J. **Sugarcane Ethanol - Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment.** Netherlands: Wageningen Academic Publishers 252p. 2008.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M. B.; MILLER D. H. L. (eds.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 106 p. 2007.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíra: Livraria e Editora Agropecuária, 203 p. 2000.

FRENEY, J. R. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified methods. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, n.4, p.1049-1054, 1985.

GALDOS, M. V. **Dinâmica do carbono no agrossistema cana-de-açúcar.** (Tese Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 101p. 2007.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e de industrialização em Minas Gerais. **Engenharia Sanitária Ambiental** v. 15 n. 3 jul/set p.217-222. 2010.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis, In: Klute, A. (Ed.), **Methods of soil analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods. 2.ed.** Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, v.1, pp. 383-409. 1986.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, 5 (1): 1-38, Jan. 1983.

GNANSOUNOU, E.; PANICHELLI, L.; DAURIAT, A.; VILLEGAS, J. D. Accounting for indirect land-use changes in GHG balances of biofuels - Review of current approaches. **École Polytechnique Fédérale de Lausanne**, Lausanne, 2008.

GOMES, J. **Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo.** (Tese Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Faculdade de Agronomia Porto Alegre-RS, 151p. 2006.

GOUVEIA, S. E. M.; PESSENDA, L. C. R.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; SCHEEL-YBERT, R.; BENDASSOLI, J. A.; RIBEIRO, A. S.; FREITAS, H. A. Carbon isotopes in charcoal and soils in studies of paleovegetation and climate changes during the late Pleistocene and the Holocene in the southeast and centerwest regions of Brazil. **Global and Planetary Change**, 33, 95-106. 2002.

GRANLI, T.; BOCKMAN, O. C. Nitrous oxide from agriculture. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, Supplement n.12, 1-128. 1994.

HARGROVE, W. I. **Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions**, In: BOCK, B. R.; KISSEL, D. E. (Ed.) Ammonia volatilization from urea fertilizers. NFDC, TVA, n. 2, p. 17-36, 1988.

IBGE 2012. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Retrieved 1st March 2012, <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/default>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006**. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> Acesso em 20 de agosto de 2009.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), **Climate Change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M B.; MILLER D H. L. (eds.) Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007.

IVO, W. M. P. M.; ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D.; BARBOSA, G. V. S.; VASCONCELOS, J. N. Impulsionando a produção e a produtividade da cana-de-açúcar. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, v.1. Parte 8. Cap. 1. p. 673-716. 2008.

JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; SANTOS, H. P.; TORRES, E.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Em busca da mitigação da produção de óxido nitroso em sistemas agrícolas: avaliação de práticas usadas na produção de grãos no Sul do País. In: ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; AITA C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO F. A. O. (Org.). **Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no Seqüestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Porto Alegre, 2006.

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.82, p.161-173, 2008.

JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; COLEMAN, K. Soil Organic Matter: Its Importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. **Advances in Agronomy**, v. 101, p. 1-57, 2009.

KEMPERS, A. J.; ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate method. *Commun. In Soil. Sci. Plant Anal.*, 17(7), 715-723. 1986.

KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; FERGUSON, R. B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. **Soil Science Society of America Journal**, n. 98, p. 1793-1796, 1988.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change Review **Geoderma** 123 (1-22), 2004.

LAPOLA, D. M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J. A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v 107, p. 3388 – 3393, 2010.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H., MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH<sub>3</sub> na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p.481-487, 1997.

- LEE, J.; SIX, J.; KING, A. P.; VAN KESSEL, C.; ROLSTON, D. E. Tillage and field scale controls on greenhouse gas emissions. **Journal of Environmental Quality**, Madison, 35(3):714-725, 2006.
- LEITE, G. F. Avaliação econômica da adubação com vinhaça e da adubação mineral de soqueiras de cana-de-açúcar na Usina Monte Alegre Ltda. - Monte Belo – MG **Revista Universidade de Alfenas**, 5: 189-181, 1999.
- LIMA, M. A.; LIGO, M. A. V.; CABRAL, O. M. R.; BOEIRA, R. C.; NEVES, M. C.; PESSOA, M. C. P. Y. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de referência: Emissões de gases de efeito estufa na queima de resíduos agrícolas. **Embrapa Meio Ambiente /Ministério da Ciência e Tecnologia** 2002.
- LISBOA, C. C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – Know and unknowns. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 3, p. 1-16, 2011.
- LIU, X. J.; MOSIER, A. R.; HALVORSON, A. D.; REULE, C. A.; ZHANG, F. S. Dinitrogen and N<sub>2</sub>O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 39, p. 2362–2370, 2007.
- LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.525-532, 2003.
- MACEDO, I. C. **Situação atual e perspectivas do etanol**. Estudos Avançados, v. 21, p.157-165, 2007.
- MACEDO, I. D. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). **Biomass Bioenergy** 14, 77–81, 1998.
- MACHADO, L. A.; HABIB, M. E. M. **Perspectivas e impactos da cultura de cana-de-açúcar no Brasil**. <http://www.infobibos.com/Artigos/2009-2/Cana/index.html>.
- MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**: v. 28, n° 2. 329-334, 2005.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. Editora Agronômica Ceres, 2006, 638 p.
- MALÇA, J.; ROZAKIS, S.; FREIRE, F. Análise energética do ciclo de vida de biocombustíveis: aplicação à fileira do bioetanol em França. **3ª Jornadas Politécnicas de Engenharia ISEC**, Novembro19-20, 2003.
- MARTHA JÚNIOR, G. B. **Produção de forragem e transformação do nitrogênio do fertilizante em pastagem irrigada de capim tanzânia**. Piracicaba, 2003. (Tese Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T. Soja e Adubos verdes, uma boa opção na renovação do canavial. **O Agrônomo**, n° 52 (1), p. 19, 2000.
- MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR., G. B. Productivity of sugarcane cultivars in different soils and harvesting periods. **Scientia Agricola**, Abr./Jun, v. 58, n. 2, p.295-301. 2001.
- MENDONZA, H. N. S.; LIMA E.; ANJOS, L. H. C. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 201-207, 2000.

- MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: uma síntese histórica. **Revista da Agronomia**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 11-22, 1999.
- MOSIER, A.; WASSMANN, R.; VERCHOT, L.; KING, J.; PALM, C. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. **Environment, Development and Sustainability**, v. 6, p. 11–49, 2004.
- MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; MCMUTRIE, R. E.; MCGILVRAY, H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. **Global Change Biology** v8, 105-123. 2002.
- NASSAR, A. M.; RUDOR, B. F. T.; ANTONIAZZI, L. B.; AGUIAR, D. A.; BACCHI, M. R. P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes in ZUUBIER, P.; VOOREN, J. **Sugarcane Ethanol - Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment**. Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 252p. 2008.
- NEILL, C.; MELLILA, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, F. L.; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, Washington, v. 7, p. 1216-1225, 1997.
- NOGUEIRA, L. A. H.; SEABRA, J. E. A.; BEST, G.; LEAL, M. R. L. V.; POPPE, M. K. **Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. 1ed. Rio de Janeiro: BNDES, v. 1. 316p. 2008.
- NOVOA, R. S. A.; TEJEDA, H. R. Evaluation of the N<sub>2</sub>O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 29 –46, 2006.
- OLIVEIRA, B. G. **Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presentes no sedimento do canal de distribuição**. (Dissertação Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 97p. 2010.
- OLIVEIRA, J. B.; MONIZ, A. C., Levantamento pedológico detalhado da estação experimental de Ribeirão Preto. **Bragantia**, 35, 59-114, 1975.
- OLIVEIRA, O. C.; OLIVEIRA, I. P. D.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M., Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 103, 289-300. 2004.
- OLSEN, K. K. Multiple wavelength ultraviolet determination of nitrate concentration, method comparisons from the Preakness Brook Monitoring Project, October 2005 to October 2006. **Water Air Soil Pollut.** 187:195-202. 2008.
- OVERREIN, L. N.; MOE, P. G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. **Soil Science Society América Proceedings**, v. 31, p. 57-61, 1967.
- PAUL, F.; CLARK, H. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press, 300 p. 1996.
- PAUSTIAN, K. O. Carbon emissions and sequestration. P (175-180). 2005. In HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. **Encyclopedia of soils in the environment 4ed**. Academic Press; 2005.

- PES, L. Z. **Fluxos de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do Rio Grande do Sul.** (Dissertação Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS 91p. 2009.
- PINHEIRO, E. F. M.; LIMA, E.; CEDDIA, M. B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Estoque de carbono e nitrogênio num Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de colheita da cana-de-açúcar. Influência da queima ou manutenção da palhada. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Agrobiologia.** v. 15, p. 1-15, 2007.
- POLWSON, D. S. Will soil amplify climate change? **Nature**, London, v.433, p.204-205, 2005.
- POST, W. M.; IZAURRALDE, R. C.; MANN, L. K.; BLISS, N. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. **Climatic Change**, 51, 73-99. 2001.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química de solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fund. Cargill, 170p. 1987.
- RAZAFIMBELO, T.; BARTHES, B.; LARRÉ-LARROUY, M.; DE LUCA E.; LAURENT, J.; CERRI C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 115: 285–289. 2006.
- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE Brazil. **Plant and Soil**, v.281, p.339-351, 2006.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes.** Viçosa: NEPUT, 367p. 1997.
- REYNOLDS, C. M.; WOLF, D. C.; ARMBRUSTER., J. A. Factores releade to urea hydrolysis in soils. **Soil Science Society America Journal.** v. 49, p. 104-108, 1987.
- RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Volatilização de amônia após emprego de ureia em diferentes doses e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 37-43, 1986.
- ROJAS, C. A. L.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WEBER, M. A.; VIEIRO, F. Volatilização de amônia da ureia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no centro-sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36: 261-270. 2012.
- ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 35, p. 799-805, 2005.
- ROSCOE, R; BUURMAN, P; VELTHORST, E J; VASCONCELLOS, C A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C isotopic ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, v.104, p.185-202, 2001.
- ROSSATO, R.; AMADO, T. J. C.; LOVATO, T.; CONCEIÇÃO, P. C.; GRAPPEGIA JR., G.; PEDROSO, M. T. Influência dos diferentes sistemas de manejo nos estoques de carbono e nitrogênio total do solo na Microbacia de Agudo – RS **XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água.** Cuiabá, MT, 21 a 26 de julho de 2002.

- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. *Remote Sensing*, v. 2, p.1057-1076, 2010.
- SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba.** (Dissertação Mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 119p. 2010.
- SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: Atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 525-533, 1997.
- SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, **Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia**, 370p. 1999.
- SILVA, G. A. **Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana-de-açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico.** (Tese Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. 208p. 2011.
- SILVA, V. M.; TRIVELIN, P. C. O.; COLAÇO, W.; ENCARNAÇÃO, F. A. F.; LARA CABEZAS, W. A. R. Mineralização e volatilização do nitrogênio da vinhaça-<sup>15</sup>N na presença ou não de ureia e de palha de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v.56, n.1, p.117-123, 1999.
- SISTI, C. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 1 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.76. p.39-58, 2004.
- 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**, 241, 155-176. 2002.
- SMITH, J. L.; MYUNG, H. U. Rapid procedures for preparing soil and KCl extracts for <sup>15</sup>N analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 21, 2273-2279. 1990.
- SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v.54, p.779-791. 2003.
- SMITH, K. A.; CONEN, F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. **Soil Use and Management**, v. 20, p. 255-263, 2004.
- SMITH, K. A.; MOSIER, A. R.; CRUTZEN, P. J.; WINIWARTER, W. The role of N<sub>2</sub>O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in earth`s climate. **Philosophical Transactions of The Royal Society**. 367, 1169-1174, 2012.
- SMITH, P. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: influence of direct human-induced, indirect and natural effects. **European Journal of Soil Science**, 56, 673-680. 2005.
- SOARES L. H. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. BODDEY R. M. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. **Circular Técnica 27** CNPAB Abril, 14p. 2009.
- SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **PAB**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- 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.** (Tese Doutorado) Centro de Energia Nuclear na Agricultura - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 105p 2007.

- TAN, I. Y. S.; ES, H. M.; DUXBURY, J. M.; MELKONIAN, J. J.; SCHINDELBECK, R. R.; GEOHRING, L. D.; HIVELY, W. D.; MOEBIUS, B. N. Single-event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type, tillage, rotation and fertilization. **Soil and tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 19-26, 2009.
- TERRÉ, R. M.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; RESENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, Netherland, v. 234, p. 15-26, 2001.
- URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; CAMPOS, D. V. B.; BODDEY, R. M. Aplicação de Técnicas de <sup>13</sup>C em Estudos de Sequestro de C em solos Agrícolas. In: ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no Sequestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa**. 1ed. Porto Alegre: Genesis, p. 13-34. 2006.
- URQUIAGA, S.; XAVIER, R. P.; MORAIS, R. F.; BATISTA, R. B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; MAIA e SÁ, J.; BARBOSA, K. P.; RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Evidence from field nitrogen balance and <sup>15</sup>N natural abundance data for the contribution of biological N<sub>2</sub> fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, v. 356, p. 5-21. 2012.
- UNICA, União da Indústria de Cana-de-açúcar. Bioeletricidade: Cresce a utilização de vinhaça de cana para gerar energia e como fertilizantes. **Notícias** 27/04/2012. <http://www.unica.com.br/noticia>. Acesso em 15/12/2012.
- VELDKAMP, E. Organic Carbon turnover in three tropical soil under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.1, p. 175-180, Jan/Feb. 1994.
- VITORELLO, V. A.; CERRI, C. C.; ANDREUX, F.; FELLER, C.; VICTORIA, R. L. Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 3, p. 773-778, 1989.
- WASSMANN, R.; VLEK, P. L. G. Mitigating greenhouse gas emissions from tropical agriculture: scope and research priorities. **Environment, Development and Sustainability** 6: 1-9, 2004.
- WEBER, M. A. **Leguminosas e os estoques de Carbono e Nitrogênio do solo em experimento de longa duração**. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 122p. 2008.
- ZANZARINI, R. M.; SANTOS R. J.; ALBINO, K. G. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. In: **XIII SBGFA: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. UFV06 a 10/07/09 <http://www.geo.ufv.br/simpósio/trabalhos/trabalhos completos/eixo11/078.pdf>. Programa on line, 2009.
- ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 28-40, 2005.
- ZOTELLI, L. C. **Palha e emissões de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em solo com cana-de-açúcar**. (Dissertação Mestrado) Instituto Agrônômico. Campinas 77p. 2012.