

UFRRJ

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

TESE

**Manejo do Nitrogênio e Emissão de Gases de Efeito
Estufa na Produção de Capim-Elefante para
Bioenergia**

Rafael Fiusa de Moraes

2011



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

**MANEJO DO NITROGÊNIO E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO
ESTUFA NA PRODUÇÃO DE CAPIM-ELEFANTE PARA
BIOENERGIA**

RAFAEL FIUSA DE MORAIS

Sob a Orientação do Professor

Bruno José Rodrigues Alves

e Co-orientação dos Professores

Segundo Urquiaga e

Robert Michael Boddey

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

Seropédica, RJ
Dezembro de 2011

633.2

M827p MORAIS, Rafael Fiusa de, 1982-

T MANEJO DO NITROGÊNIO E EMISSÃO DE GASES DE
EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE CAPIM-ELEFANTE
PARA BIOENERGIA / Rafael Fiusa de MORAIS -
2011.88 f.: il.

Orientador: Bruno José Rodrigues Alves
Tese (Doutorado) - Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Instituto de
Agronomia.

Bibliografia: f.

1. Capim-elefante - Teses. 2. Nitrogênio -
Fixação - Teses. 3. Energia da biomassa -
Teses. I. Bruno José Rodrigues Alves, xxx-
II. Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Instituto de Agronomia. 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

RAFAEL FIUSA DE MORAIS

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

TESE APROVADA EM 22/12/1982

Bruno José Rodrigues Alves. Dr. Embrapa Agrobiologia
(Orientador)

Adelson Paulo de Araújo. Dr. UFRRJ

Érika Flávia Machado Pinheiro. Dra. UFRRJ

John Edmund Lewis Maddock. Dr. UFF

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

José Carlos Polidoro. Dr. Embrapa Solos

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese a toda minha família, composta por meus verdadeiros mestres, modelos reais de perseverança, parceria, dedicação, paciência e ética.

Em especial:

*Aos meus pais Zacarias Feitosa de Moraes e Ana Sátiro Fiusa de Moraes;
A minha Esposa Camila Santos Barros de Moraes
Aos meus irmãos Marcos Fiusa de Moraes e Leonardo Fiusa de Moraes;*

*“Bom mesmo é ir a luta com determinação
Abraçar a vida com paixão, perder
com classe e vencer com ousadia,
pois o triunfo pertence a quem se atreve.....”*

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

A DEUS, que sempre iluminou meus caminhos;

Ao meu pai Zacarias Feitosa de Moraes, minha mãe Ana Sátiro Fiusa de Moraes, meus irmãos Marcos Fiusa de Moraes e Leonardo Fiusa de Moraes e minha esposa Camila Santos Barros de Moraes, pelo carinho e complacência principalmente nos momentos mais complicados;

A toda minha família, especialmente ao meu tio e professor Raimundo Nonato de Moraes;

A CAPES, pela concessão de bolsa de estudo para realização dos meus estudos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Curso de Pós Graduação em Agronomia - Ciência do solo e aos seus professores.

Aos pesquisadores da Embrapa Agrobiologia Segundo Urquiaga, Robert Michael Boddey, Bruno J. R. Alves e Claudia Pozzi Jantalia pela orientação

À Embrapa Agrobiologia, por todo apoio de estrutura, financeiro e pessoal para a realização do trabalho.

Ao Pessoal do Laboratório de Química Agrícola (Altiberto, Renato Moutinho, Roberto Andrade, Monalisa, Gisele, Ednelson e Estagiários) e de Ciclagem de Nutrientes (Roberto Grégio) da Embrapa Agrobiologia. Ao pessoal de campo da Embrapa Agrobiologia.

Aos amigos e colegas que eu conheci nos últimos 6 anos. Espero que eu consiga listar todos, e que a vida proporcione o reencontro sempre que for possível: Rogério, Alex, Fábio Freire e Carlo Freire, Renato, Cícero Cartaxo, Roberto Gabriel, Hernandes Feitosa, Bruno Juscelino, José Marcos, Diego, David, Ednaldo Araújo, Ricardo Tarré, Erika, Claudia, Roberta, Ana Paula,

A todos os companheiros do alojamento da Embrapa CNPAB.

A todos que fizeram parte deste caminho, mesmo não estando aqui presente.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

Rafael Fiusa de Moraes nascido em São Bernardo do Campo, São Paulo, no dia 28 de dezembro de 1982, iniciou suas atividades relacionadas à agropecuária no ano de 1998 quando ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Crato - Ceará, cursando o técnico em agropecuária e concluindo em 2000. Durante este período, desenvolveu algumas atividades relacionadas com agricultura, bovinocultura, caprinocultura, diversas culturas regionais e levantamentos sócio-culturais. Em 2001 prestou vestibular para o curso de Licenciatura em Ciências Agrícolas na UFRRJ, e graduou-se em março de 2006. Durante o curso, trabalhou com Fertilidade do Solo, onde teve seu primeiro contato com a área de pesquisa. Em agosto de 2003, ingressou como bolsista de iniciação científica do CNPq na Embrapa Agrobiologia, sendo bolsista até março de 2006, quando concluiu a graduação. Em 2006 iniciou o Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo, como bolsista da CAPES, desenvolvendo a dissertação “Potencial produtivo e eficiência da fixação biológica de nitrogênio de cinco genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.), para uso como fonte alternativa de energia.” Em 2008 ingressou no Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo, desenvolvendo a tese intitulada “Fixação biológica de nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa na produção de capim-elefante para bioenergia”.

RESUMO

Morais, Rafael Fiusa de. **Manejo do nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa na produção de capim-elefante para bioenergia**. 2011. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

O capim-elefante está entre as gramíneas de maior capacidade de acumulação de matéria seca, possuindo também características qualitativas favoráveis para a produção de energia. A sustentabilidade de seu uso depende basicamente de seu balanço energético e da quantidade de gases de efeito estufa decorrentes das práticas de manejo, do cultivo e do uso de sua biomassa. Geralmente, a contribuição da fixação biológica de nitrogênio atende a menos do que metade da demanda de N da cultura, sendo necessário repor o N retirado do sistema. O uso de fertilizantes nitrogenados é a opção mais recomendada, porém não se sabe o impacto quanto as emissões de N_2O para a atmosfera. O objetivo geral desse estudo foi realizar experimentos que permitissem medir as perdas de N de fertilizantes na forma de volatilização de amônia e emissão de N_2O . A volatilização de amônia foi avaliada por estar relacionada as emissões de N_2O indiretas. Também se estudaram os efeitos de doses, fontes e formas de aplicação de N, visando identificar a melhor forma de fornecer nitrogênio para a cultura, com menor impacto nas emissões de N_2O . Foram avaliadas as emissões de N_2O decorrentes da etapa de preparo do solo e da aplicação de quatro doses de nitrogênio fertilizante na forma de ureia (40, 80, 120 e 160 kg de N ha^{-1}). Foram avaliadas diferentes fontes de N fertilizante (ureia e sulfato de amônio) e formas de aplicação da ureia (incorporada ou a lanço) em comparação com sulfato de amônio, respectivamente, e adubação verde, em comparação a aplicação de ureia comum e revestida com polímeros, sobre a eficiência do uso do N pelas plantas e sobre as emissões de N_2O do solo. Os resultados mostraram que a adubação nitrogenada é essencial para alcançar elevadas produtividades de biomassa em capim-elefante. As emissões de N_2O foram maiores com a utilização da ureia do que com a utilização do sulfato de amônio, não havendo efeito da incorporação da ureia. A utilização da adubação verde acarretou em maiores emissões de N_2O quando comparada a ureia. As perdas por volatilização de NH_3 variaram entre 40 a 60% do N aplicado na forma de ureia, e de 11% quando se utilizou sulfato de amônio. As perdas por volatilização de NH_3 foram 35% menores quando a ureia foi enterrada, o que acarretou maiores ganhos de produtividade pelo capim-elefante. A ureia revestida com polímeros acarretou em diminuição de 6 % das perdas por volatilização de NH_3 . A utilização do fertilizante nitrogenado é essencial para alcançar elevadas produtividades de biomassa do capim-elefante, e o impacto ambiental causado por essa prática pode ser reduzido em função da fonte e da forma de aplicação do fertilizante.

Palavras-chave: Biomassa. ^{15}N . Capim-elefante.

ABSTRACT

Morais, Rafael Fiusa de. **Nitrogen management and greenhouse gases emissions in elephant grass production for bioenergy**. 2011 88p Thesis (Doctor Science in Agronomy-Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Elephant grass is highly efficient in dry matter accumulation and has suitable quality parameters for energy production. The use of elephant-grass biomass depends on the energy balance and the greenhouse gas emissions associated with management practices used for biomass for energy production. Generally, the contribution of biological nitrogen fixation serves less than half the crop N demand, it is necessary to replace the N removed from the soil. N fertilization is usually recommended, however the impact on N₂O emissions to atmosphere is unknown. The aim of this study was to carry out studies to measure N fertilizer losses in the form of ammonia volatilization and N₂O emissions. Ammonia volatilization was evaluated since it is related to indirect N₂O emissions. The effects of nitrogen doses, sources and application forms were studied, to identify the best pathway to provide nitrogen for the crop, with less impact on N₂O emissions. The N₂O emissions resulting from the soil tillage and four urea fertilizer doses (40, 80, 120 and 160 kg N ha⁻¹) were evaluated. Different nitrogen fertilizer sources (urea and ammonium sulfate) and urea application forms (incorporated or surface) compared with ammonium sulfate, respectively, and green manure were evaluated, compared to application of urea and polymer-coated urea, to evaluate the nitrogen efficiency by the plants and soil N₂O emissions. The results showed that nitrogen fertilization is essential to reach high biomass yield of elephant grass. N₂O emissions were higher with urea application than with ammonium sulfate, with no effect on the quantity of urea incorporated. The use of green manure resulted in higher N₂O emissions compared to urea. The NH₃ volatilization losses ranged from 40 to 60% when urea was applied and 11% with the application of ammonium sulfate. The NH₃ volatilization losses were 35% lower when urea was incorporated, resulting in higher elephant grass biomass yield. The polymer-coated urea resulted in a decrease of 6% in the NH₃ volatilization losses. Nitrogen fertilizer is essential to reach high elephant grass biomass yield, and the environmental impact caused by this practice may be reduced by changing the source and form of the fertilizer application.

Key words: Biomass. Urea. Elephant grass.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Emissões de CO₂ do solo da área preparada convencionalmente e da área controle. As setas representam as três etapas de preparo do solo e a fertilização. 20
- Figura 2.** Precipitação e emissões de CH₄ do solo da área preparada convencionalmente. As setas representam as três etapas de preparo do solo. 21
- Figura 3.** Precipitação, temperatura do ar (a), emissão de N₂O (b), espaço poroso saturado por água (EPSA) (C) e temperatura do solo (D) durante o período de preparo do solo até a colheita do capim-elefante cultivado com quatro doses de N-fertilizante aplicadas na forma de ureia. As setas representam as datas das três etapas de preparo do solo e da aplicação de N-fertilizante (aração, duas gradagens e aplicação das doses de N-fertilizante)..... 22
- Figura 5.** Regressão linear entre as emissões acumuladas de N₂O com quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia aplicadas em um Argissolo cultivado com capim-elefante..... 24
- Figura 6.** Regressão linear entre a quantidade de N perdida por volatilização de N-NH₃ (kg ha⁻¹) com quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia aplicadas em um Argissolo cultivado com capim-elefante..... 24
- Figura 7.** Precipitação diária, temperatura do ar (A) e umidade do solo (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de experimentação. As setas representam as datas das coletas realizadas. 25
- Figura 8.** Produção de colmos, folhas e total do capim-elefante cultivado com quatro doses de N-fertilizante aplicadas como ureia. *ajuste significativo a 5% de probabilidade. ^{Ns} não significativo..... 26
- Figura 9.** Nitrogênio total acumulado em colmos e folhas em capim-elefante cultivado sob a aplicação de quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia. * ajuste significativo a 5% de probabilidade. ^{Ns} não significativo..... 27
- Figura 10.** Teores de fibra em detergente neutro (FDN) do genótipo de capim-elefante cameron em função de quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia. ^{Ns} não significativo. 28
- Figura 11.** Relações carbono/nitrogênio (A) e caule/folha (B) do genótipo de capim-elefante cameron em função de quatro doses de N-fertilizante aplicadas como ureia. ^{Ns} não significativo. 29
- Figura 12.** Poder calorífico superior (PCS) em função das concentrações de nitrogênio nos colmos e folhas de capim elefante. 30
- Figura 13.** Precipitação diária e temperatura média do ar (A), espaço poroso saturado por água (B) e emissões de N₂O (C) derivadas da aplicação de diferentes doses e fontes de N-fertilizante em solo plantado com a cultura do capim elefante, em Seropédica-RJ.*S.A. Sulfato de Amônio..... 31
- Figura 14.** Teores de NO₃⁻ (a) e NH₄⁺ (b) do solo antes e após a aplicação de doses e fontes de N-fertilizante. A seta representa a data da aplicação de n-fertilizante. *S.A. Sulfato de amônio..... 32

- Figura 15.** Quantidade de N-NH₃ volatilizada (A) e proporção volatilizada do total de N aplicado (B) nas doses de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, e na dose de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de sulfato de amônio*, em um Argissolo cultivado com capim-elefante. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. 34
- Figura 16.** Precipitação diária, temperatura do ar (A) e espaço poroso do solo saturado com água (EPSA) (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de experimentação. 35
- Figura 17.** Produção de biomassa (colmos e folhas) do genótipo de capim-elefante Cameron cultivado com doses de N-fertilizante na forma de ureia em comparação com sulfato de amônia. S.A. Sulfato de amônio (100 kg N ha⁻¹). Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. 37
- Figura 18.** Nitrogênio acumulado nos colmos e folhas do genótipo cameron cultivado com doses de N-fertilizante na forma de ureia e sulfato de amônia. S.A. Sulfato de amônio (100 kg n ha⁻¹). Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. 37
- Figura 19.** Relação caule/folha (A) e relação carbono/nitrogênio (B) e da biomassa do genótipo cameron cultivado com doses e fontes de N-fertilizante. S.A. Sulfato de amônio. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. 38
- Figura 20.** Precipitação mensal e temperatura do ar (A), espaço poroso saturado por água (B), emissões de N₂O (C) e temperatura do solo (D) derivadas da aplicação de ureia enterrada, ureia cobertura e sulfato de amônio em cultivo de capim-elefante. A seta representa a data de aplicação do N-fertilizante. 40
- Figura 21.** Variação da concentração de nitrato e amônio do solo (0-10 cm) cultivado com capim-elefante sob diferentes formas de fertilização. A seta representa a data de aplicação dos tratamentos. 41
- Figura 22.** Volatilização de NH₃ (kg ha⁻¹ de N) estimada para solo com aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio em superfície para o cultivo do capim-elefante. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. 42
- Figura 23.** Precipitação diária, temperatura do ar (Fonte: INMET) (a) e EPSA do solo (b) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de coletas do N volatilizado. As setas representam as datas das três coletas realizadas... 43
- Figura 24.** Produtividade de matéria seca de colmos e folhas do capim elefante (Mg ha⁻¹ de matéria seca), genótipo cameroon, sob duas formas de aplicação de ureia (cobertura e enterrada) e sulfato de amônio aplicado superficialmente. Letras iguais não diferem pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade. 44
- Figura 25.** Nitrogênio acumulado em colmos e folhas (kg ha⁻¹ de N) do genótipo cameroon sob duas formas de aplicação de ureia, em cobertura e enterrada, e sulfato de amônio aplicado em cobertura. Letras iguais não diferem pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade. 45
- Figura 26.** Precipitação mensal e temperatura do ar (A), espaço poroso saturado por água (B), emissões de N₂O (C) e temperatura do solo (D) derivadas do cultivo e da incorporação

da biomassa de feijão de porco e sorgo em pré-plantio de capim-elefante. As setas representam as datas dos eventos realizados.	47
Figura 27. Teores de NO_3^- (A) e de NH_4^+ (B) do solo durante o cultivo dos adubos verdes e após sua incorporação ao solo. As setas representam as datas dos eventos realizados.	48
Figura 28. $\delta^{15}\text{N}$ na parte aérea de sorgo e de feijão de porco (a) em diferentes épocas de desenvolvimento das plantas, e contribuição da FBN (%) em feijão de porco (B) estimada utilizando-se as plantas de sorgo como testemunha.	49
Figura 29. Produção de biomassa (A) e quantidade de n acumulado (B) em função do dia após o plantio (DAP) em feijão de porco e sorgo cultivados em pré-plantio do capim-elefante.	50
Figura 31. Precipitação diária, temperatura do ar (Fonte: INMET) (A) e EPSA (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de amostragens de volatilização de amônia. As setas representam as datas das seis coletas realizadas.	52
Figura 32. Produção de biomassa do capim-elefante cultivado após adubação verde, ou fertilizado com ureia revestida Kimberlit® ou com ureia comum. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.	53
Figura 33. Nitrogênio acumulado na biomassa do capim-elefante cultivado após adubação verde com feijão de porco, ou tratado com ureia comum ou com ureia revestida Kimberlit®, e no tratamento controle sem adição de N. Média com letras iguais não diferem entre si pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.	53
Figura 34. Relação entre percentual de espaço poroso do solo ocupado com água (EPSA%), e os fluxos das emissões CO_2 observados durante o preparo de um Argissolo.	56
Figura 35. Relação entre os fluxos de CO_2 e a temperatura do solo durante o preparo convencional do solo.	56
Figura 36. Relação entre os fluxos de CO_2 e nitrogênio mineral das amostras de solo ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) coletadas durante o preparo convencional de um Argissolo localizado no município de Seropédica-RJ.	57
Figura 37. Relação entre os fluxos de N_2O e espaço poroso saturado com água dos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.	61
Figura 38. Relação entre os fluxos de N_2O e teores de nitrato do solo (10 cm) observados nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.	62
Figura 39. Relação entre os fluxos de N_2O e teores de amônio (10 cm) observados nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.	62
Figura 40. Relação entre os fluxos de n_2o e a temperatura do solo obtidos dos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.	63
Figura 41. Emissão de N- N_2O por tonelada de matéria seca do primeiro experimento de capim-elefante cultivado sob diferentes doses de N-fertilizante na forma de ureia. * significativo a 5% de probabilidade	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Rendimento energético de algumas culturas utilizadas para geração de bioenergia no Brasil (Mazzarella, 2008).	4
Tabela 2. Contribuição da FBN obtida em capim-elefante estimada pelas técnicas isotópicas de ^{15}N e balanço de N em diferentes genótipos de capim-elefante.	5
Tabela 3. Resultado da análise química e composição textural de um Argissolo Vermelho Amarelo antes da implantação do primeiro experimento localizado em Seropédica – RJ.	11
Tabela 4. Fatores de emissão de N_2O provenientes da aplicação de três doses de N-fertilizante na forma de ureia e uma dose na forma de sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.....	33
Tabela 5. Fatores de volatilização calculados para cada dose de ureia e de sulfato de amônio aplicada a um Argissolo cultivado com capim-elefante.	36
Tabela 6. Fatores de emissão de N_2O provenientes da aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.....	41
Tabela 7. Fatores de volatilização de NH_3 provenientes da aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.....	43
Tabela 8. Quantidades de N (kg ha^{-1}) provenientes do fertilizante acumuladas na planta e no solo estimadas através da utilização de fertilizante enriquecido com ^{15}N , e as perdas por volatilização de amônia, N_2O e outras vias, para os tratamentos com formas de aplicação de ureia e com sulfato de amônio.	45
Tabela 9. Percentagem de N provenientes do fertilizante acumuladas na planta e no solo estimadas através da utilização de fertilizante enriquecido com ^{15}N , e as perdas por volatilização de amônia, N_2O e outras vias, para os tratamentos com formas de aplicação de ureia e com sulfato de amônio.	46
Tabela 10. Coeficientes de correlação de pearson entre os fluxos de CO_2 , espaço poroso saturado com água (EPSA), temperatura do solo (TSOLO) e n mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) obtidos durante o preparo convencional de um Argissolo, em Seropédica-RJ.	57
Tabela 11. Coeficientes de correlação de Pearson entre os fluxos de N_2O , espaço poroso saturado com água (EPSA), teores de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) e N mineral total obtidos nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo em Seropédica – RJ.	64
Tabela 12. Fatores de emissão para N_2O de todos os tratamentos testados nos três ciclos do capim-elefante.....	64
Tabela 13 Emissão em de N- N_2O por tonelada de matéria seca do primeiro experimento de capim-elefante cultivado sob diferentes doses de N-fertilizante na forma de ureia. * significativo a 5% de probabilidade.	69
Tabela 14. Balanço de N do sistema solo-planta em um Argissolo cultivado com capim-elefante adubado com ureia (superficial e enterrada), sulfato de amônio e com adubação verde realizada em pré-plantio da cultura.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

%N_{dda} - Percentual de nitrogênio da planta derivado do ar
BEN - Balanço Energético Nacional
CH₄ - Metano
CO₂ - Dióxido de carbono
CQNUNC - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima.
CTC - Capacidade de Troca Catiônica
DAP - Dias após o plantio
EUFN - Eficiência do uso do fertilizante nitrogenado
FBN - Fixação biológica de nitrogênio
FDN - Fibra em detergente neutro
FE – Fator de emissão, ou fração do nitrogênio aplicado emitido na forma de N₂O
FIA - Análise por Injeção em Fluxo, do inglês, *Flow Injection Analysis*
FTE BR12 - Nome comercial de adubo que representa um conjunto de micronutrientes fritos, neste caso, contendo 9 % de zinco, 1,8 % de boro, 0,8 % de cobre, 2 % de manganês, 3,5 % de ferro e 0,1 % de molibdênio.
GEE - Gases de efeito estufa;
GJ - Giga Joules
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*
kcal - Kilocaloria
kPa - KiloPascal
M.S. - Matéria seca
MME - Ministério de Minas e Energia
MOS - Matéria orgânica do solo
N₂O - Óxido Nitroso
nifD - Gene que codifica uma subunidade beta da proteína nitrogenase
PCR - Reação em cadeia da polimerase, do inglês, *Polymerase Chain Reaction*
PCS - Poder calorífico superior
PET - Politereftalato de etileno
ppb- parte por bilhão
S.A. - Sulfato de Amônio
SRC-1 - Câmara de respiração do solo, modelo 1, do inglês, *Soil Respiration Chamber, modelo 1*
U - Ureia
UV - Ultravioleta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 O Capim-Elefante para uso como fonte de Energia Alternativa	3
2.2 Importância da FBN em Capim Elefante	4
2.3 Técnica de Abundância Natural de ¹⁵ N.....	5
2.4 Adubação Nitrogenada em Capim-Elefante.....	6
2.5 Os Gases de Efeito Estufa e a Agricultura	8
2.6 Fluxos de CO ₂ , N ₂ O e CH ₄ em solos.....	8
2.7 Adubação Nitrogenada e Emissão de N ₂ O do Solo.....	9
2.8 Volatilização de Amônia por Fertilizantes Nitrogenados	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Emissões de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O Derivadas do Preparo do Solo e da Fertilização Nitrogenada em Capim-elefante. Experimento I.....	11
3.1.1 Caracterização experimental, etapas do preparo do solo e aplicação dos tratamentos	11
3.1.2 Quantificação da emissão de CO ₂	12
3.1.3 Quantificação da emissão de N ₂ O e CH ₄	12
3.1.4 Cálculo dos fatores de emissão de N ₂ O.....	13
3.1.5 Quantificação do N volatilizado (NH ₃) do fertilizante.....	13
3.1.6 Determinação do espaço poroso saturado por água (EPSA) e dos Teores de amônio e nitrato do solo.	14
3.1.7 Produtividade, nitrogênio acumulado, relação C/N e C/F teores de fibras em detergente neutro e cinzas da biomassa.....	14
3.1.8 Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante.....	15
3.1.9 Poder calorífico superior em capim elefante	15
3.2 Emissões de N ₂ O Provenientes da Aplicação da Ureia e do Sulfato de Amônio em Argissolo Cultivado com Capim-elefante. Experimento II.....	16
3.2.1 Implantação do experimento	16
3.2.2 Quantificação das emissões de CO ₂ , N ₂ O e CH ₄ e da volatilização de NH ₃	16
3.2.3 Cálculo dos fatores de emissão para N ₂ O do fertilizante	16
3.2.4 Determinação do EPSA e dos teores de nitrato no solo	16
3.2.5 Produção e N acumulado na biomassa	16
3.2.6 Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante.....	17
3.3 Influência da Forma de Aplicação da Ureia, em Comparação com Sulfato de Amônio, no Balanço de Nitrogênio em Capim-elefante. Experimento III.....	17
3.3.1 Implantação do experimento	17
3.3.2 Quantificação das emissões de N ₂ O, fatores de emissão para N ₂ O, volatilização de NH ₃ e teores de NO ₃ e NH ₄ do solo.....	17
3.3.3 Produção de matéria seca e nitrogênio total acumulado.....	17
3.3.4 Fixação biológica de nitrogênio	17
3.3.5 Eficiência do uso do fertilizante nitrogenado.....	17
3.4 Influência da Adubação Verde e da Ureia Revestida com Polímero nas Emissões de N ₂ O do Solo e na Produção de Biomassa do Capim-elefante. Experimento IV.....	18
3.4.1 Delineamento experimental e implantação dos tratamentos	18
3.4.2 Quantificação das emissões de N ₂ O	18

3.4.3	Biomassa, nitrogênio acumulado e fixação biológica de nitrogênio no feijão de porco	19
3.4.4	Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante.....	19
3.4.5	Quantificação da volatilização de NH ₃	19
3.4.6	Determinação dos fatores de emissão, EPSA, teores de nitrato e amônio e umidade do solo.....	19
3.4.7	Produção de matéria seca e nitrogênio total acumulado no capim-elefante.....	19
3.4.8	Análises estatísticas	19
4.	RESULTADOS	20
4.1	Emissões de GEE Derivadas do Preparo do Solo e da Fertilização Nitrogenada em Capim-elefante. Experimento I.	20
4.1.1	Emissões de CO ₂	20
4.1.2	Emissões de CH ₄	20
4.1.3	Emissões de N ₂ O	21
4.1.4	Fatores de emissão de N ₂ O para os fertilizantes.....	23
4.1.5	Volatilização de amônia derivada das doses de N-fertilizante	24
4.1.6	Produção e nitrogênio total acumulado na biomassa.....	26
4.1.7	Fixação biológica de nitrogênio	27
4.1.8	Parâmetros qualitativos da biomassa.....	27
4.2	Emissões de N ₂ O Provenientes da Aplicação de duas Fontes de Nitrogênio Fertilizante: Ureia e Sulfato de Amônio. Experimento II.	30
4.2.1	Emissão de N ₂ O, EPSA e variáveis climáticas	30
4.2.2	Fatores de emissão para N ₂ O das duas fontes de N-fertilizante aplicadas	32
4.2.3	Volatilização de amônia derivada das fontes de N-fertilizante	33
4.2.4	Produção de biomassa e nitrogênio acumulado.....	36
4.2.5	Fixação biológica de nitrogênio	38
4.2.6	Relação carbono/nitrogênio e relação caule/folha.....	38
4.3	Influência da Forma de Aplicação da Ureia, em Comparação com Sulfato de Amônio, no Balanço de N do Sistema Solo-Planta. Experimento III.	39
4.3.1	Emissão de N ₂ O, EPSA e variáveis climáticas.	39
4.3.2	Fatores de emissão.....	41
4.3.3	Volatilização de amônia derivada das doses de N-fertilizante	42
4.3.4	Produção de biomassa	44
4.3.5	Fixação biológica de nitrogênio	45
4.3.6	Eficiência do uso do nitrogênio derivado do fertilizante.....	45
4.4	Influência da Adubação Verde e da Ureia Revestida com Polímero nas Emissões de N ₂ O do Solo e na Produção de Biomassa do Capim-elefante. Experimento IV.	46
4.4.1	Emissão de N ₂ O, EPSA e variáveis climáticas.	46
4.4.2	Teores de NO ₃ ⁻ e NH ₄ ⁺ do solo nas etapas experimentais	47
4.4.3	Quantificação da FBN para o feijão de porco	48
4.4.4	Produção de biomassa e N acumulado das espécies adubos verde	49
4.4.5	Volatilização de NH ₃ derivada da ureia	50
4.4.6	Produção de biomassa e nitrogênio total acumulado pelo capim-elefante.....	52
4.4.7	Fixação biológica de nitrogênio	54
5.	DISCUSSÃO	55
5.1	Emissões de CO ₂	55
5.2	Emissões de CH ₄	58
5.3	Emissões de N ₂ O	58

5.4 Variáveis Relacionadas às Emissões de N ₂ O	60
5.5 Fatores de Emissão para N ₂ O do Fertilizante.....	64
5.6 Fatores de Emissão para N ₂ O dos Resíduos.....	65
5.7 Influência da Leguminosa nas Emissões de N ₂ O do Solo.....	65
5.8 Volatilização de Amônia	66
5.9 Produção e Características Qualitativas da Biomassa	67
5.10 Fixação Biológica de Nitrogênio.....	68
5.11 Emissão de N ₂ O por Tonelada de Biomassa Seca Produzida	68
5.12 Eficiência de Uso do Nitrogênio Fertilizante e dos Adubos Verdes.....	70
5.13 Impacto da Fertilização e da Adubação Verde no Balanço Energético e de Gases de Efeito Estufa	71
6. CONCLUSÕES	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
8. ANEXOS	87

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a busca por fontes alternativas de energia ao uso de combustíveis fósseis vem crescendo globalmente. A biomassa de plantas pertencentes a família das Poáceas, de metabolismo C4 com alto potencial produtivo como *Miscanthus* spp, *Panicum* spp e *Saccharum* spp, têm se destacado nesse cenário (WOODARD e PRINE, 1993; SARTORI et al., 2006). No Brasil, o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) vem sendo avaliado para produção de energia térmica, em função da alta produtividade, eficiência energética, fixação biológica de nitrogênio (FBN) e qualidade da biomassa (SAMSON et al., 2005; MORAIS et al., 2011).

O capim-elefante é uma cultura que demanda grandes quantidades de nutrientes do solo, especialmente os macronutrientes. Por isso, a reposição destes se faz necessária para manter os elevados níveis de produtividade (QUESADA, 2005). Entre os macronutrientes, o nitrogênio (N) é um dos mais requeridos, e alguns estudos têm comprovado que a FBN é um importante processo que fornece este elemento às plantas, contribuindo para um balanço de energia do sistema mais positivo (SAMSON et al., 2005). Nos trabalhos de Quesada (2001; 2005) e Morais et al. (2009) foram observadas contribuições significativas da FBN em capim-elefante, com valores próximos de 50 % do total do N acumulado pela planta, especialmente quando crescida em solos com baixa disponibilidade deste nutriente. Apesar disso, grande parte do N utilizado pela cultura ainda vem do solo (cerca de 50%), e deve ser reposta para manutenção dos níveis de produtividade da cultura.

A principal forma de reposição do N em sistemas agrícolas é através do uso de fertilizantes nitrogenados (HARRISON e WEBB, 2001). Por outro lado, sua utilização necessariamente implica em aumento no consumo de energia fóssil (SAMSON et al., 2005) e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) do solo, sendo o mais importante, o óxido nitroso (N₂O) (DOBBIE e SMITH, 2003).

Os principais processos envolvidos nas emissões de N₂O em solos agrícolas são os de nitrificação e de desnitrificação (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em média, 1,0% do N aplicado como fertilizante nitrogenado é perdido como N₂O (IPCC, 2006), bem como aquele originado do retorno de N através dos resíduos culturais (BAGGS et al., 2000). A natureza do N (mineral ou orgânica), a fonte (uréia, nitrato ou amônio) e a forma de aplicação dos fertilizantes (aplicados em superfície ou incorporados), apresentam influência sobre as emissões de N₂O (SKIBA e SMITH, 2000).

Zanatta et al. (2010) compararam diferentes fontes de N aplicadas ao solo por um período de 2 anos, e constataram maiores emissões de N₂O com a aplicação de sulfato de amônio em comparação com a uréia. Dobbie e Smith (2003) observaram maiores emissões de N₂O após a aplicação de nitrato de amônio em relação à uréia, ambos com emissões de N₂O superiores ao controle sem N.

As perdas por volatilização da amônia podem afetar significativamente a eficiência do uso do N nos solos agrícolas (HARRISON e WEBB, 2001). As perdas de NH₃ além de afetarem a produtividade da cultura, também estão relacionadas indiretamente com a contabilidade das emissões de N₂O pelo uso dos fertilizantes nitrogenados. Segundo o IPCC (2006), 10 % de todo o N aplicado como fertilizante é volatilizado na forma de NH₃, dos quais 1% é emitido como N₂O em função de processos de nitrificação/desnitrificação que ocorreriam após a deposição do N volatilizado.

O desenvolvimento de sistemas de manejo do solo com capacidade de diminuir as perdas por volatilização de amônia é uma importante etapa na busca da diminuição das emissões totais de GEE (HARRISON e WEBB, 2001). Outra preocupação esta relacionada ao

efeito da fertilização nitrogenada sobre a possibilidade de alteração do potencial calorífico da biomassa, em função de mudanças dos constituintes orgânicos e do aumento da proporção de folhas (MCKENDRY, 2002). Considerando-se os impactos negativos da fertilização nitrogenada, uma das alternativas para aumentar o suprimento de N para o sistema solo-planta seria a adubação verde com leguminosas (JENSEN et al., 2011), embora seja uma prática ainda não testada para a produção de capim elefante.

As hipóteses científicas deste trabalho foram:

- a) A FBN é uma importante fonte de N em capim-elefante, porém não atende toda a demanda da cultura.
- b) As perdas de N nas formas de NH_3 e N_2O podem ser diminuídas em função da dose, da fonte e da forma de aplicação do fertilizante nitrogenado.
- c) A emissão de N_2O proveniente do fertilizante nitrogenado em Argissolo cultivado com capim elefante é menor do que a estimada com a metodologia do IPCC.
- d) A utilização de leguminosa para adubação verde em pré-plantio do capim elefante é uma alternativa para mitigar as emissões de GEE quando em comparação com a ureia.
- e) A qualidade da biomassa do capim-elefante para gerar energia é afetada pelo aumento do conteúdo de N nos tecidos.

Os objetivos do estudo foram:

- a) Quantificar a FBN associada à cultura do capim-elefante.
- b) Avaliar a produtividade e a qualidade da biomassa do capim-elefante para bioenergia, cultivado com diferentes doses e fontes de N fertilizante.
- c) Estimar fatores de emissão direta de N_2O de fertilizantes aplicados na cultura do capim-elefante em um Argissolo, no município de Seropédica (RJ).
- d) Quantificar as perdas de N nas formas de NH_3 e N_2O derivadas da aplicação de diferentes doses e formas de aplicação de ureia, e de sulfato de amônio.
- e) Avaliar o efeito da adubação verde com *Canavalia ensiformis* e da ureia sobre a eficiência do uso do N pela planta, e sobre as emissões de N_2O de um Argissolo cultivado com capim-elefante.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Capim-Elefante para uso como Fonte de Energia Alternativa

A utilização da biomassa do capim elefante é bastante difundida na alimentação de animais (MISTURA et al., 2006; ANDRADE et al., 2005). Nos últimos anos, porém, a elevada produtividade de biomassa que se obtém com a cultura, despertou interesse na sua utilização para geração de energia. Altas produtividades anuais, semelhantes ou mesmo superiores às de culturas tradicionalmente usadas para produção de biomassa, como o eucalipto, podem ser conseguidas com um manejo envolvendo baixa utilização de insumos, o que contribui para um balanço de energia muito positivo (MORAIS et al., 2011; SAMSON et al., 2005). Quesada (2005) e Morais et al. (2009) quantificaram produção de matéria seca da ordem de $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com teores de fibras e lignina acima de 60% e 10% respectivamente, além de baixos teores de proteínas e cinzas, utilizando somente fertilização com P e K, e realizando dois cortes por ano. Na literatura é bem evidenciado que os principais fatores que controlam a produtividade e as características qualitativas da biomassa são o intervalo entre cortes e disponibilidade de nutrientes (CUNHA et al., 2011; ZANETTI, 2010; FLORES, 2009; QUESADA, 2005).

As principais finalidades energéticas que a biomassa do capim-elefante têm sido indicadas são a utilização em termoeletricas e para combustão direta em fornos de cerâmicas em substituição a lenha e ao carvão. Para esta última finalidade, a biomassa do capim-elefante é cortada no campo, secas em local apropriado, e depois levadas para queima direta.

Quanto ao balanço de energia neste sistema, Samson et al. (2005) encontraram que para a etapa agrícola de produção do capim elefante se obtém um valor de 21:1, mostrando que para cada unidade de energia fóssil utilizada no processo produtivo do capim-elefante foram obtidas cerca de 21 unidades de energia renovável. Esta condição é válida quando o material é utilizado diretamente para combustão. Qualquer procedimento que promova mudanças quanto ao estado da biomassa, por exemplo, transformar a biomassa em carvão, haverá mudanças no balanço de energia (Tabela 1). Considerando uma produtividade de $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca (MS), a energia bruta produzida é de $493 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (SAMSON et al., 2005). Transformando a biomassa em carvão, o balanço de energia ainda é bem superior ao obtido com as culturas como soja e girassol (MAZZARELLA, 2008).

Pelas elevadas produtividades, o cultivo de capim-elefante promove uma grande extração de nutrientes. Quesada (2005) avaliou a composição química inorgânica da biomassa de capim elefante e encontrou teores de K de 0,54 a 1,12 %; Ca de 0,32 a 0,54 %; Mg de 0,18 a 0,29%; e P de 0,08 a 0,19% e N de 0,7 a 1,2 %. Esses teores, associados às elevadas produtividades obtidas, podem acarretar em acúmulos de nutrientes na biomassa acima de 200 kg ha^{-1} de K, 45 kg ha^{-1} de P, 80 kg ha^{-1} de Mg, 160 kg ha^{-1} de Ca e 200 kg ha^{-1} de N. Entre os macronutrientes, o N está entre os de maior limitação para a planta, embora, alguns trabalhos mostrem que a fixação biológica de nitrogênio (FBN) pode representar uma importante fonte de N para essa espécie (MORAIS et al., 2011; ZANETTI et al., 2010; MORAIS et al., 2009; QUESADA, 2005; REIS et al., 2001).

Tabela 1. Rendimento energético de algumas culturas utilizadas para geração de bioenergia no Brasil (MAZZARELLA, 2008).

Cultura/Produtividade	Biomassa	GJ ha⁻¹	Balanco Energético
Cana-de-açúcar (74 Mg ha ⁻¹)	Álcool (6400 l)	141	7,04
Capim-Elefante 30 Mg ha ⁻¹	Palha Carvão	493 238	21,3 4,41
Dendê 18 Mg ha ⁻¹	Óleo (3240 kg)	154	8,66
Soja 2,54 Mg ha ⁻¹	Óleo (457 kg)	17	1,03
Girassol 1,6 Mg ha ⁻¹	Óleo (640 kg)	24	2

2.2 Importância da FBN em Capim Elefante

A associação de bactérias fixadoras de nitrogênio com gramíneas ganhou enorme importância principalmente com a descoberta de que bactérias do gênero *Azospirillum* colonizavam os tecidos internos das raízes, indicando que a interação com a planta poderia resultar em uma associação com maior potencial de exploração agrícola (DÖBEREINER e DAY, 1975). A presença de bactérias fixadoras de nitrogênio do gênero *Herbaspirillum*, em plantas fibrosas C4, tais como *Spartina pectinata*, *Miscanthus sinensis*, *Miscanthus sacchariflorus* e *Pennisetum purpureum*, foi detectada por Kirchhof et al. (2001). A habilidade em fixar nitrogênio foi testada por amplificação em PCR (em inglês significa Polymerase chain reaction) do gene *nifD* (codifica uma subunidade da proteína nitrogenase) e pela técnica de redução de acetileno. Nos isolados, foi observada a presença da bactéria nas quatro plantas estudadas, sendo que em *Pennisetum purpureum* e *Miscanthus sinensis* foi observada em raízes lavadas, em *S. pectinata* em raízes e caules lavados, e em *M. sacchariflorus* em folhas, raízes e caules lavados (KIRCHHOF et al., 2001).

Estudos em que foi empregada a técnica de diluição isotópica de ¹⁵N para a estimativa de contribuição da FBN em gramíneas forrageiras (BODDEY e VICTORIA, 1986 e MIRANDA e BODDEY, 1987) registraram contribuições da FBN da ordem de 10% em *Paspalum notatum* cv. Batatais, de 24 a 38% para ecótipos de *Panicum maximum*, e de 30 a 40% para *B. humidicula* e *B. decumbens*, respectivamente. No trabalho desenvolvido por Reis et al. (2001) foram encontradas bactérias fixadoras de N₂, especialmente do gênero *Herbaspirillum* (em raízes e colmos de capim-elefante). Recentemente no trabalho de Videira et al. (2011) foram isolados os gêneros de bactérias diazotróficas *Gluconacetobacter*, *Azospirillum* e *Burkholderia* em raízes e caules de capim-elefante.

A descoberta das associações entre bactérias e o capim-elefante levaram alguns pesquisadores a buscarem mais informações com experimentos de campo (QUESADA, 2001; 2005; MORAIS, 2008). No estudo desenvolvido por Quesada (2001) os genótipos que apresentaram maiores contribuições da FBN foram Cameroon e o Roxo com um total de 44 e 35 %. Já no estudo desenvolvido por Quesada (2005) foram encontrados os maiores valores de FBN associados aos genótipos Cameroon e Gramafante com 55 e 56 % de FBN respectivamente. Morais (2008), no experimento localizado em Anchieta (ES) observou que os genótipos que mais se destacaram foram CNPGL F06-3 (45%) e CNPGL F79-2 (44%). Em um estudo conduzido em Seropédica, as maiores contribuições de FBN foram de 39 e 38 % para os genótipos Cameroon e CNPGL F06-3, respectivamente. Considerando a média de todos os estudos realizados a contribuição da FBN se manteve próxima de 40% (tabela 2).

Tabela 2. Contribuição da FBN obtida em capim-elefante estimada pelas técnicas isotópicas de ^{15}N e balanço de N em diferentes genótipos de capim-elefante.

Genótipos	Quesada	Quesada	Morais	Morais
	(2005)*	(2001)*	(2008 ^A)	(2008 ^S)
Dependência da FBN (%)				
Gramafante	55	29	34 b	37 a
Cameroon	56	44	37 ab	39 a
BAG 02	54	34	41 a	36 a
Roxo	51	35	-	29 b
CNPGL F06-3	-	-	45 a	38 a
CNPGL F79-2	-	-	44 a	-
Média	54	36	40	36
CV (%)	23	21	18	24
Média (Intervalo de confiança)	41 (38 - 44)			

*Não foi possível aplicar teste de médias.

^A Anchieta-ES; ^S Seropédica. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem a $P < 0.05$ (Teste de LSD).

Considerando uma produtividade de $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca, cerca de 300 kg ha^{-1} de N são extraídos anualmente. Levando em consideração a contribuição média da FBN para o capim elefante conforme a tabela 1, a dependência da planta pelo N do solo anualmente seria superior a $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$.

No trabalho desenvolvido por Morais (2008), observou-se um decréscimo dos estoques de N do solo, sendo explicado pelo autor pela contínua remoção de N na biomassa, sem que nunca tenha sido adicionado N ao solo. Como a FBN supriu não mais do que a metade do N acumulado na biomassa, parte do N do solo, absorvido pela cultura, acabou sendo gradualmente removida do sistema. Observou-se que, em média, cerca de 90 kg N ha^{-1} foram retirados anualmente do solo. Por isso Morais (2008) ressaltou que, embora a FBN seja de grande importância para o capim-elefante, a reposição do N que foi absorvido do solo, é fundamental para a obtenção dos altos níveis de produtividade de biomassa.

2.3 Técnica de Abundância Natural de ^{15}N

A técnica da abundância natural de ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) é bastante utilizada em experimentos a campo e baseia-se no fato de que, geralmente, o N do solo é levemente enriquecido com o isótopo ^{15}N em comparação ao N_2 do ar (UNKOVICH et al., 2008) O nitrogênio do ar apresenta cerca de 0,3663% de ^{15}N e o restante (99,6337%) de ^{14}N (JUNK e SVEC, 1958). Porém, devido à discriminação isotópica que ocorre durante as transformações do nitrogênio no sistema solo-planta, ambos podem apresentar valores de ^{15}N um pouco maiores que os encontrados na atmosfera (SHEARER e KOHL, 1986). Estas variações são extremamente pequenas, convencionando-se então que cada unidade de delta ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) seria a abundância natural dividida por mil, ou seja, 0,0003663 átomos % de ^{15}N em excesso. Espécies que são capazes de obter do ar a maior parte do nitrogênio necessário para sua nutrição, apresentarão valores de $\delta^{15}\text{N}$ bem próximos a zero, uma vez que a maior parte do N virá do ar, que é o padrão da técnica e possui 0,3663 % de ^{15}N , ou seja, zero unidades de $\delta^{15}\text{N}$. Por outro lado, as espécies não fixadoras crescendo no mesmo solo terão valores de $\delta^{15}\text{N}$ mais elevados e próximos aos do solo, uma vez que toda ou a maior parte do N necessário para o seu desenvolvimento é derivada deste.

Esta técnica, como todas as outras utilizadas na determinação da contribuição da FBN para as plantas, também apresenta limitações, exigindo algumas considerações. Assim como

as outras técnicas isotópicas, esta técnica depende da premissa básica de que as plantas fixadoras e não-fixadoras, crescendo no mesmo solo, absorvam nitrogênio do solo com a mesma marcação com ^{15}N (SHEARER e KOHL, 1986). Esta limitação pode ser contornada selecionando-se espécies-referência, com desenvolvimento radicular e demanda de N semelhantes à planta avaliada. Outra limitação do método consiste no alto custo das análises, e a necessidade de um maior cuidado com a manipulação das amostras (BODDEY, 1987). Além das dificuldades descritas acima, é importante considerar também os valores de fracionamento isotópico (valor B) das plantas fixadoras crescendo em meios livres de N combinado. Estas variações se dão em nível de espécie da planta, das estirpes das bactérias diazotróficas envolvidas, e do estágio e condições de crescimento. Para plantas da família das Poáceas, como cana-de-açúcar, este valor é considerado 0, pois é considerado que não existe uma discriminação de ^{15}N na planta (BODDEY et al., 2001). Já para plantas da família das leguminosas, é necessário que se utilize um fator de correção, que possa expressar a discriminação isotópica de ^{15}N feita por cada espécie (PEOPLES et al., 1989). Por outro lado, as diferenças que possam existir na exploração do volume do solo pelas raízes das plantas teste e controle e as diferenças na curva de absorção de nutrientes entre elas, são fatores que permitem sugerir o uso de mais de uma espécie como referência (UNKOVICH et al., 2008). Ainda assim, o uso desta técnica, com os devidos cuidados descritos acima, normalmente apresenta alta correlação com a técnica de diluição isotópica de ^{15}N com aplicação de ^{15}N -fertilizante na marcação do solo que é, atualmente, a técnica mais difundida e aceita para fins de quantificação da contribuição da FBN para as plantas (UNKOVICH et al., 2008).

2.4 Adubação Nitrogenada em Capim-Elefante

A aplicação de fertilizantes nitrogenados é a principal forma de reposição do N recomendada para capim-elefante (CARVALHO et al., 1994). Mistura et al. (2006) e Fagundes et al. (2007) observaram que a adubação nitrogenada aumentou significativamente os níveis de produtividades do capim, não afetando a qualidade da biomassa para uso na alimentação animal. Andrade et al. (2000), em experimento com capim-elefante submetido à doses crescentes de N e K, constataram ganhos de produtividade da ordem de 4 Mg ha^{-1} de matéria seca (MS) com a aplicação da dose de 180 kg de N na forma de ureia. Este mesmo tipo de resposta já foi observado por outros autores na literatura como Mota et al. (2010) e Andrade et al. (2006). A prática da fertilização nitrogenada está associada a um aumento da produtividade de biomassa e acúmulo de N em capim-elefante, sendo fundamental para a manutenção das produtividades (QUESADA, 2005).

Sob o ponto de vista de utilização de capim-elefante para geração de energia, a composição desejável para a biomassa é diferenciada daquela para alimentação animal. Algumas características como baixa umidade da biomassa, altos teores de fibras e lignina e baixos teores de cinzas são desejáveis para gerar energia eficientemente (MAZZARELLA, 2007), enquanto que para oferta de forragem, se busca especialmente elevados teores de proteínas (ANDRADE et al., 2005).

Em relação ao N, as variações esperadas de teor de proteína na planta não deveriam afetar significativamente o poder calorífico da biomassa. Zanetti (2010) e Flores (2009) avaliaram o poder calorífico de diferentes amostras de parte aérea de capim-elefante (colmos e folhas) com teores crescentes de N nos tecidos, não encontrando diferenças relevantes, indicando que a qualidade da biomassa não deveria ser afetada caso as plantas sejam crescidas com uma maior oferta de N no solo.

Embora seja essencial para obter elevadas produtividades, o uso da fertilização nitrogenada está associado a aumentos nos custos energéticos e nas emissões de GEE do sistema (SAMSON et al., 2005; CLAYTON et al., 1997). Esses são fatores que devem ser avaliados de forma criteriosa e podem influenciar significativamente o potencial de mitigação de GEE em relação a outras fontes de energia não renováveis (CRUTZEN et al., 2008). Por

isso, o fornecimento de N às plantas através de fontes que representem maior eficiência e menores custos devem ser avaliadas.

A adubação verde é uma das opções que pode fornecer grandes quantidades de N com baixos custos energéticos para as culturas. As plantas pertencentes à família das leguminosas são as mais indicadas por possuírem elevada capacidade de fixar o N atmosférico mediante a simbiose com rizóbio nas raízes (JENSEN et al., 2011). Além disso, outros motivos como alto teor de N e a presença de um sistema radicular geralmente bem profundo e ramificado, são características que influenciam positivamente a sua utilização (ALCÂNTARA et al., 2000; TEIXEIRA et al., 2005).

Considerando-se que uma leguminosa utilizada como adubo verde deva possuir em seus tecidos em média 2 % de N no período da floração, relacionada a uma produção de 10 Mg ha⁻¹ de matéria seca, pode-se dizer que algumas espécies anuais são capazes de contribuir com cerca de 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, com um percentual considerável (60 – 80%) proveniente da FBN (URQUIAGA e ZAPATA, 2000). Este tipo de benefício para capim-elefante foi reportado por Quesada (2001). O autor observou que o uso da prática de adubação verde em pré-plantio acarretou em ganhos significativos de biomassa de capim elefante, equivalendo à aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

Rodrigues et al. (2004) destacaram o potencial de FBN e ciclagem de nutrientes do feijão de porco, e encontraram produtividade de biomassa de 13,5 Mg ha⁻¹ de matéria seca quando cultivado em um Latossolo Amarelo. Nessa ocasião, mais de 250 kg ha⁻¹ de N foram adicionados ao solo.

Embora grandes quantidades de N sejam adicionadas ao solo, alguns trabalhos, relatam um baixo aproveitamento do N por culturas sucessoras (SILVA et al., 2006; ARAÚJO et al., 2011). Em outro trabalho desenvolvido por Araújo et al. (2011) a utilização do N aplicado na forma de adubo verde foi somente de 16 %. Nos trabalhos realizados por Scivittaro et al. (2000) e Xavier (2002) também foi observada uma contribuição pequena da leguminosa utilizada como adubo verde no fornecimento de N para as plantas de milho e de cana-de-açúcar respectivamente, não superando 20% e 18% do N acumulado na parte aérea das plantas de cana, respectivamente. Os autores reportaram que a baixa contribuição pode estar relacionada à imobilização do N no solo e as perdas que podem ocorrer no sistema.

Os benefícios da adubação verde sobre o fornecimento de N às plantas também foi discutido por Chalk (1998). O autor destacou os benefícios do cultivo das leguminosas em rotação de culturas sobre o balanço de N no sistema solo/planta em cultivos de cereais. Os benefícios retratados pelo autor estão correlacionados com dois principais efeitos. O primeiro é que grande parte do N acumulado pelas plantas é fornecido pela própria FBN durante o seu crescimento. Nessa ocasião as plantas leguminosas quase não absorvem N do solo e isto ocasionaria um efeito de reserva de N no solo a culturas sucessoras. O segundo benefício esta associado à liberação do N da biomassa, proveniente da FBN, que ocorre principalmente após a decomposição dos resíduos vegetais.

Embora existam efeitos positivos diretos e indiretos no uso de leguminosas na adubação verde e/ou rotação de culturas, alguns questionamentos podem ser realizados, especialmente sob o ponto de vista de emissão de GEE do solo. O aumento da disponibilidade de N no solo pode ter relação direta com as emissões de N₂O do sistema (HARRISON e WEBB, 2001). Neste caso, existe a possibilidade de que o efeito de reserva de N observado nas áreas cultivadas com leguminosas possa induzir o aumento das emissões de N₂O do solo. Esta hipótese foi apresentada no trabalho de Jensen et al. (2011). Os autores afirmam que as emissões de N₂O em áreas cultivadas com plantas leguminosas estão associadas aos maiores teores de N mineral do solo, incluindo o efeito de reserva de N, e não diretamente ao processo de FBN associado às plantas. Segundo a metodologia do IPCC (1996), que ainda é usada para

inventários de GEE, 1,25% do N fixado por plantas leguminosas é emitido na forma de N₂O. Alguns autores, como Alves et al. (2010a) e Jensen et al. (2011) questionam essa suposição.

2.5 Os Gases de Efeito Estufa e a Agricultura

Os principais gases de efeito estufa (GEE) são o dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄). Diversas ações relacionadas às atividades econômicas e industriais têm provocado alterações na atmosfera desde a revolução industrial, acarretando em aumentos na concentração desses gases na atmosfera. De acordo com o IPCC (2007), a agricultura contribui com 25%, 65% e 90 % do total das emissões antropogênicas de CO₂, CH₄ e N₂O respectivamente.

Além da pecuária, na agricultura as principais práticas agrícolas com impacto sobre as emissões de GEE são: o cultivo dos solos, o uso de fertilizantes e a queima da biomassa. O preparo intensivo do solo (uso de grades e arados) causa decréscimo nos teores de C do solo, decorrente do aumento da taxa de mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), sendo fontes diretas de emissão de CO₂ (ESCOBAR et al., 2010; CERRI et al., 2001). A emissão de N₂O pela agricultura está relacionada com a dinâmica do N no solo, a qual sofre influência do uso de plantas de cobertura e da fertilização (ALLEN et al., 2011). Emissões relevantes de CH₄ são observadas em solos alagados, tendo a cultura do arroz irrigado um importante papel (COSTA, 2005). Apesar de emitidos em menor quantidade, o N₂O e o CH₄ apresentam, respectivamente, um potencial de aquecimento global de 296 e 25 vezes superiores ao do CO₂ (IPCC, 2007), o que justifica a importância da avaliação desses gases nos estudos com práticas de manejo de potencial de mitigação do aquecimento global. 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 pesquisas em nível regional (ESCOBAR et al., 2010).

2.6 Fluxos de CO₂, N₂O e CH₄ em Solos

O preparo convencional (PC) do solo, composto por intensas atividades de revolvimento, ocasiona o rompimento dos agregados do solo, expondo parte do C protegido no seu interior, tornando-o suscetível à mineralização (ESCOBAR et al., 2010). Posteriormente, podem ocorrer aumentos das taxas de decomposição da matéria orgânica do solo MOS e das emissões de CO₂ (LA SCALLA et al., 2001).

Os fluxos de N₂O nos solos estão relacionados aos processos de nitrificação e desnitrificação (FIRESTONE e DAVIDSON, 1989). A nitrificação é realizada por bactérias autotróficas e dependem basicamente de condições aeróbias do solo assim como da disponibilidade de NH₄⁺. Por outro lado, a desnitrificação ocorre em condições anaeróbicas e é realizada por bactérias heterotróficas anaeróbicas facultativas. Estas bactérias, na ausência de O₂, oxidam formas orgânicas de C utilizando o NO₃⁻ como aceptor final de elétrons. Ambos os processos podem ocorrer simultaneamente no solo, ocupando zonas com maior ou menor conteúdo de água dependendo do processo (BATEMAN e BAGGS, 2005).

A aplicação de fertilizante nitrogenado pode contribuir para a emissão de N₂O em diferentes magnitudes dependendo da forma química do adubo, NH₄⁺ ou NO₃⁻ (CLAYTON et al., 1997; JONES et al., 2005; RUSSOW et al., 2008). Fertilizantes nítricos somente podem contribuir para a emissão de N₂O do solo através do processo de desnitrificação, enquanto formas amoniacais e amídicas podem participar pela nitrificação e desnitrificação. Alguns estudos têm verificado maiores emissões de N₂O a partir de fontes nítricas (CLAYTON et al., 1997; DOBBIE e SMITH, 2003; JONES et al., 2005; RUSSOW et al., 2008) e este padrão tem sido relacionado às condições de clima e solo, principalmente umidade do solo, favorecendo o processo de desnitrificação. Contrariamente, a atividade nitrificadora nas

mesmas condições é reduzida, o que determina que as formas amoniacais e amídicas de N resultem em menores emissões de N₂O se comparadas às formas nítricas.

Segundo estudos realizados por Bouwman (1996), com no mínimo um ano de avaliação, há uma relação linear e positiva entre a quantidade de N aplicado e as emissões de N₂O do solo. Esta relação define que a cada 100 kg de N aplicado ao solo, 1,25 kg de N são emitidos à atmosfera como N₂O (FE). Os resultados apresentados por Bouwman (1996) foram aprovados pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC) e conseqüentemente utilizados na elaboração de inventários nacionais de GEE proposta na metodologia do IPCC. Posteriormente, no ano de 2006, o FE do IPCC adotado foi de 1%, porém ainda não esta aprovada pela CQNUMC.

Embora existam diferenças entre as emissões de N₂O em relação às diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados existentes, o FE proposto pelo IPCC ainda é utilizado nos cálculos das emissões de N₂O apenas com base na quantidade de N aplicado no solo, independente do tipo de cultura e forma química do adubo.

O CH₄ é um gás que está relacionado com a produção entérica de CH₄ pelo rebanho bovino e pela cultura do arroz irrigado (HOUGHTON et al., 2001), mas praticamente não afeta o balanço de GEE, em sistema aeróbicos como os usados na produção de capim elefante.

2.7 Adubação Nitrogenada e Emissão de N₂O do Solo

Nos últimos anos o consumo de fertilizantes nitrogenados no Brasil tem crescido substancialmente. No ano de 2008, mais de 56 % do consumo de N total correspondeu à ureia, e 17% ao sulfato de amônio (ANDA, 2008). A ureia apresenta algumas vantagens sob o ponto de vista agrícola, especialmente pela elevada concentração de N (44 a 46%), menores custos com transporte, armazenamento e aplicação, além do menor preço por unidade de N (WERNECK, 2008). Com relação ao sulfato de amônio, este possui 21% de N, e é a segunda fonte nitrogenada mais utilizada no Brasil. Além do N, contém 23% de S em sua composição, baixa higroscopicidade e boas propriedades físicas, que facilitam sua aplicação no solo.

A utilização de N através da fertilização, ou da aplicação de resíduos culturais, tem relação direta com o aumento das emissões de N₂O do solo (CLAYTON et al., 1997; BAGGS et al., 2000). A fonte do N mineral afeta diretamente às emissões de N₂O, assim como o modo de sua aplicação. Dobbie e Smith (2003) constataram maiores emissões de N₂O na aplicação de nitrato de amônio em relação à ureia, o mesmo sendo observado por Costa et al. (2008b). Clayton et al. (1997) encontraram que a fração do N do fertilizante perdida como N₂O no tratamento com ureia foi 3,5 vezes maior do que no tratamento com sulfato de amônio. A variabilidade das emissões de N₂O quanto a diferentes fontes de N testadas comprova a necessidade de intensificar as pesquisas nesse tema, especialmente pelo fato de que os impactos ambientais causados por esta prática podem ser reduzidos (ZANATTA et al., 2010; ESCOBAR et al., 2010).

Uma alternativa aos fertilizantes nitrogenados é a utilização de fontes orgânicas como as plantas leguminosas utilizadas na adubação verde. Grandes quantidades de N podem ser incorporadas ao solo com esta prática. Porém, estas grandes quantidades de N adicionadas ao solo podem acarretar em maiores emissões de N₂O do solo (ZANATTA et al., 2009). Estudos que evidenciam o efeito desta prática sobre as emissões de N₂O do solo são inexistentes na literatura.

2.8 Volatilização de Amônia por Fertilizantes Nitrogenados

A perda por volatilização de amônia é indicada como a principal responsável pela baixa eficiência do uso dos fertilizantes nitrogenados em sistemas agrícolas, especialmente na utilização da ureia (CO(NH₂)₂) (HARRISON e WEBB, 2001). Grande parte do N aplicado através de fertilizantes não é aproveitado pelas culturas, e em alguns casos, mais de 50 % do

N aplicado é volatilizado como NH_3 (WERNECK, 2008). Isto está associado, principalmente, a fatores de clima e de solo como umidade, temperatura, fontes de N, tipo de solo e pH (HARRISON e WEBB, 2001).

Sangoi et al. (2003) avaliaram as perdas de NH_3 em diferentes solos e formas de aplicação da ureia e observaram que quando a ureia é incorporada ao solo, as perdas por volatilização são substancialmente menores do que quando aplicada superficialmente, com uma redução de cerca de perdas em 65%. Os autores observaram que em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica, a capacidade de retenção da amônia, em função da baixa CTC destes solos, é bem menor, sendo recomendado, nestes casos, que a ureia seja incorporada de forma a compensar a menor capacidade de retenção destes solos.

Uma alternativa para a diminuição das perdas por volatilização de NH_3 são os fertilizantes recobertos por resinas e polímeros. Nestes tipos de fertilizantes, pode haver uma liberação do nutriente mais eficiente para aproveitamento pela planta (MATTOS, 2011), ressaltando a importância da disponibilidade de água e da temperatura envolvidas durante o processo (CHITOLINA, 1994). Estudos que relatam a influência destes polímeros sobre as perdas de N do fertilizante, especialmente sobre as perdas por volatilização de NH_3 e desnitrificação de N_2O , são escassos na literatura nacional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Emissões de CO₂, CH₄ e N₂O derivadas do Preparo do Solo e da Fertilização Nitrogenada em Capim-elefante. Experimento I

3.1.1 Caracterização experimental, etapas do preparo do solo e aplicação dos tratamentos

O experimento foi conduzido na área Experimental da Embrapa Agrobiologia, localizada em Seropédica, Rio de Janeiro, (22°46'S, 43°41'O, e altitude de 33 m). Este experimento teve a duração de 8 meses (outubro de 2008 a junho de 2009). O solo em estudo foi classificado como um Argissolo Vermelho Amarelo, série Itaguaí, segundo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O clima da região é tropical, com verões úmidos e invernos secos. No período experimental a precipitação observada foi de 1434 mm e a temperatura média foi de 25°C. A área do experimento permaneceu em pousio durante os 5 anos anteriores, sendo feito apenas manejo de controle da vegetação espontânea com capinas e roçadas. O genótipo de capim-elefante estudado foi o Cameroon, selecionado pelos bons rendimentos de biomassa e FBN, já evidenciados em trabalhos anteriores (ZANETTI et al., 2010; MORAIS et al., 2009). As características químicas do solo no momento da implantação do estudo são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Resultado da análise química e composição textural de solo Argissolo Vermelho Amarelo antes da implantação do primeiro experimento localizado em Seropédica – RJ.

Profundidade	pH H ₂ O	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	P	K ⁺	N	C	Argila	Silte	Areia
		-cmolc/dm ³ ----			-mg/dm ³ -		-----g kg ⁻¹ -----				
0-20	6,2	0	2,9	2,7	8,6	62,4	1,1	15,2	424	262	314
20-40	6,5	0	2,5	1,6	10,1	54,4	0,9	12,2	467	251	282

N - Método semimicro-Kjeldahl (ALVES et al., 1994); pH(H₂O), Al, Ca e Mg, K e P (EMBRAPA, 1997)

As etapas de preparo do solo consistiram de uma aração, realizada no dia 10 de novembro de 2008, seguida de duas gradagens realizadas nos dias 26 de novembro e 8 de dezembro de 2008. Após as gradagens, foi feito um sulco para plantio do capim-elefante. Nestes sulcos foram aplicados os adubos superfosfato simples, cloreto de potássio e um conjunto de micronutrientes na forma comercial de FTE BR12. A recomendação foi realizada com base na análise de solo e correspondeu a 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 50 kg ha⁻¹ de FTE BR12. O plantio do capim-elefante (genótipo Cameron) foi realizado dia 16 de dezembro. Aos 60 dias após o plantio (DAP) do capim foram aplicados os tratamentos com fertilizante nitrogenado na forma de ureia (40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N). Cada unidade experimental plantada com capim-elefante foi constituída de 5 linhas de 5 metros de comprimento, espaçadas de 1,0 m entre linhas, perfazendo 30 m² por parcela. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com cinco repetições totalizando 25 parcelas. Para comparação do efeito das doses sobre as emissões de gases de efeito estufa, foi feita uma única aplicação dos fertilizantes em todos os tratamentos. Em todas as etapas deste experimento, constituídas do preparo do solo, plantio e colheita do capim-elefante, foram monitoradas as emissões de CO₂, N₂O e CH₄.

3.1.2 Quantificação da emissão de CO₂

Os fluxos de CO₂ foram mensurados utilizando-se um analisador de gás por infravermelho portátil EGM-4 (Environmental Gas Monitor) da empresa PP Systems (Reino Unido) conectado a uma câmara de fluxo de CO₂ do solo, de modelo SCR-1. A câmara SRC-1 possui uma altura e um diâmetro de 15 e 10 cm respectivamente, e ocupa uma área de 78,5 cm² do solo. A câmara foi colocada diretamente sobre a superfície do solo, próximo das linhas de capim-elefante. Os fluxos de CO₂ foram medidos entre as 8:00 e 10:00 h, com início em outubro de 2008.

3.1.3 Quantificação da emissão de N₂O e CH₄

Foram utilizadas câmaras estáticas para a determinação dos fluxos de N₂O e CH₄ do solo. As estimativas das emissões destes gases foram avaliadas durante todas as etapas do experimento. Durante a etapa de preparo do solo, foram utilizadas 20 câmaras na área em que o solo foi revolvido, e 5 câmaras em uma parte que não foi revolvida, usada como referência. Após o plantio do capim-elefante, as 25 câmaras foram posicionadas nas respectivas parcelas para posterior avaliação dos tratamentos de doses de N-fertilizante.

As câmaras estáticas foram constituídas de metal e compostas por uma base retangular de 40 x 60 cm, com uma altura de 15 cm, sendo inseridas no solo a 5 cm de profundidade, e permanecendo no local até a colheita do capim-elefante (Anexo II). Essas câmaras foram fechadas com uma chapa metálica de 45 x 65 cm, circundada por uma borracha, que foi pressionada contra a base metálica, com auxílio de quatro grampos, durante o período de incubação. Cada tampa foi revestida com espuma e manta adesiva com superfície reflectiva para reduzir o efeito do sol sobre a temperatura interna da câmara. Uma válvula de três vias foi colocada na parte central da tampa para permitir a retirada dos gases no momento da amostragem. Após o fechamento por 30 minutos, foram coletadas as amostras. As amostragens dos gases foram feitas utilizando-se seringas de 50 ml. Após a coleta as amostras, 30 ml das seringas foram transferidas para frascos de vidro com auxílio de uma bomba de vácuo. Estes frascos foram lacrados com rolhas de borracha butílica. Com uma bomba de vácuo manual, todos os frascos eram evacuados com pressão de -80 kPa, e em seguida cada amostra presente nas seringas era transferida para respectivos frascos, conectando-se a seringa em uma válvula de três vias, localizada na bomba de vácuo, que permitia a comunicação com o frasco.

As amostragens foram realizadas sempre pelo horário da manhã (entre 8 e 9 horas), horário mais apropriado para coleta, pois representa o fluxo médio diário encontrado para GEEs como CO₂ e N₂O (DAVIDSON et al., 2002; ALVES et al., 2012). As concentrações iniciais ou tempo zero de amostragem (T₀) foram determinadas através da coleta de 2 amostras por bloco (8 amostras). Este procedimento foi realizado no intuito de diminuir o total de amostras a serem analisadas já que não foi observada diferença estatística significativa das médias das amostras coletadas por bloco, e quando os tempos iniciais foram coletados em todas as 25 câmaras. As amostragens de gases foram realizadas diariamente, durante 15 dias, após a aplicação dos tratamentos de preparo do solo e adubação. Após a ocorrência de chuvas, as amostragens foram feitas por 3 dias consecutivos. Nos restantes dos meses, em que fluxos de N₂O estavam estáveis, as amostragens foram feitas 2 vezes por semana. Este maior espaçamento nas coletas foi adotado no final do experimento uma vez que já não existiam variações significativas nos fluxos de N₂O entre os tratamentos. Em cada dia de coleta, era realizada a medição da temperatura do ar, da câmara e do solo para eventuais correções no momento dos cálculos dos fluxos de N₂O.

Para a quantificação dos fluxos de N₂O, foram utilizados gases padrões de concentrações de 0,410, 0,801, 1,2 e 10,0 ppm N₂O ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) para a construção da curva analítica para N₂O, incluindo-se também amostras iniciais de ar ambiente, do campo, para as

quais considerou-se uma concentração do ar de 320 ppb N₂O. Para o cálculo dos fluxos de CH₄, utilizaram-se padrões de 1,49, 10, 1000 ppm CH₄ (μmol mol⁻¹) para a construção da curva analítica. As curvas eram utilizadas para transformar os resultados de área dos picos dos gases em concentração.

As análises foram realizadas no Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, utilizando um cromatógrafo de gás (Perkin Elmer, Autosystem) equipado com uma coluna de "Porapak Q" e um detector de captura de elétrons (ECD), para análise de N₂O, e um detector de ionização de chama (FID) para análise de CH₄.

Os fluxos de cada gás (N₂O e CH₄), expressos em μg N-N₂O m⁻² h⁻¹, ou μg C-CH₄ m⁻² h⁻¹, foram calculados pela equação $F = \Delta C / \Delta t (V/A) M / V_m$, onde $\Delta C / \Delta t$ é a mudança de concentração do gás na câmara no intervalo de incubação (Δt), expressa em μmol N₂O ou CH₄ mol⁻¹ h⁻¹; V e A são, respectivamente, o volume da câmara, em L, e a área de solo coberta pela câmara, em m²; M é o peso molecular dos átomos dos elementos N e C, respectivamente, nas moléculas de N₂O e CH₄ (2 x N = 28 g mol⁻¹ ou 1 x C = 12 g mol⁻¹); e V_m é o volume molecular na temperatura de amostragem (22,4 μL μmol⁻¹, nas CNTP).

Após o cálculo dos fluxos, foram estimadas as emissões para o intervalo de tempo estudado. Inicialmente, este cálculo foi feito multiplicando-se os fluxos obtidos por 24, para obter o fluxo total diário. Para o cálculo dos fluxos nos intervalos de dias em que não foram feitas medições, multiplicou-se o número de dias do intervalo pela média das emissões dos dias onde houve amostragem, que definiam o intervalo. A emissão total no período foi a soma das emissões estimadas para cada dia.

3.1.4 Cálculo dos fatores de emissão de N₂O

A fração do N fertilizante emitida como N₂O (FE) foi calculada com o quociente entre o total de N₂O acumulado no período, pela quantidade de N aplicada como fertilizante. Para este cálculo, foram computadas as emissões acumuladas de N₂O após a aplicação do fertilizante até a colheita da biomassa do capim-elefante, mesmo havendo um período em que não se observaram mais diferença significativa entre as emissões do controle e do N₂O provenientes da aplicação de N-fertilizante.

3.1.5 Quantificação do N volatilizado (NH₃) do fertilizante

A quantificação do N volatilizado foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Araújo et al. (2009). Conforme proposto pelo autor, a captura de NH₃ é realizada por um sistema modificado de Marsola et al. (2000), denominado coletor SALE (coletor semi-aberto livre estático) e consiste de uma câmara estática confeccionada a partir de recipiente plástico transparente tipo PET de 2 litros, sem a base, com diâmetro de 10 cm, abrangendo 0,008 m² de área. Uma fita de espuma com 3 mm de espessura, 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento, é suspensa verticalmente no interior da câmara com o auxílio de um arame rígido de 1,5 mm que também servia para fixar um frasco de 50 mL no qual a parte inferior da fita era mantida. A fita era umedecida com solução de H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ + glicerina 2% (v/v), e o frasco onde a extremidade inferior estava inserida continha 10 ml de solução de H₂SO₄ + glicerina. A cada três dias a espuma foi trocada e posteriormente analisada. No laboratório, a espuma juntamente com a solução ácida remanescente no frasco de 50 ml, foi transferida para um erlenmeyer de 250 ml onde foram adicionadas 40 ml de água destilada. O erlenmeyer com a solução foi levado a um agitador horizontal, a uma agitação de 220 rpm por 15 minutos. Uma alíquota de 2 ml foi analisada por destilação à vapor e posterior titulação para quantificação do N amoniacal, tal como descrito em Alves et al. (1994).

3.1.6 Determinação do espaço poroso saturado por água (EPSA) e dos teores de amônio e nitrato do solo.

As amostras de solo foram coletadas próximas às linhas do capim-elefante, na profundidade de 0-10 cm em todas as unidades experimentais do experimento. Para a determinação da umidade gravimétrica do solo, as amostras foram pesadas frescas e levadas para secagem em estufa a 105°C por 72 horas. Após esta etapa, calculou-se a umidade volumétrica multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo. Com os dados de umidade volumétrica, calculou-se o espaço de poros saturado com água (%EPSA) pela equação:

$$\%EPSA = \left(\frac{\theta}{n} \right) \times 100$$

Sendo θ a umidade volumétrica, e n a porosidade do solo.

A porosidade foi calculada pela equação:

$$n = \left[1 - \left(\frac{\rho}{2,65} \right) \right] \times 100$$

Sendo ρ a densidade do solo, e 2,65 a densidade das partículas (D_p) em g cm^{-3} .

O valor de densidade das partículas de 2,65 foi utilizado com base nos resultados obtidos por Oliveira (2007). O autor realizou a determinação da D_p no mesmo tipo de solo deste estudo e em várias profundidades, obtendo o valor médio utilizado neste estudo. A densidade do solo foi determinada em junho de 2009 nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm em cada bloco experimental, e com três repetições em cada trincheira, utilizando o método do anel volumétrico (Kopeck) descrito em EMBRAPA (1997). Para retirada das amostras de densidade do solo foi aberta pequena trincheira de 20 cm de profundidade, com 50 cm de largura e 50 cm de comprimento. As amostras foram secas em estufa a 110°C por 72 horas e pesadas.

Antes e após do preparo do solo e da adubação, os teores de NO_3^- e NH_4^+ disponíveis no solo foram monitorados a cada 3 dias. No período de maior intensidade de amostragem foi realizada a coleta de solo 4 vezes por semana.

Para determinação das formas minerais de N no solo, foram pesados 20 g de solo de cada amostra em erlenmeyer. Cada amostra recebeu 60 ml de solução extratora de KCl 2 mol L^{-1} sendo posteriormente colocados em agitadores elétricos e mantidos em movimento pelo período de uma hora. As amostras foram filtradas e a solução obtida foi preparada para ser analisada pelo Sistema FIA, utilizando-se o método baseado no reagente de Griss-Ilosvay com redução de nitrato para nitrito utilizando-se coluna de cádmio, para quantificação da concentração de nitrato, e no reagente de Berthelot, utilizando salicilato de sódio, para quantificação de amônio (ALVES et al., 1994). O equipamento para o sistema de fluxo contínuo consistiu de um espectrofotômetro digital equipado com célula para fluxo contínuo, uma bomba peristáltica com 6 canais montada com tubos de Tygon® de vazões especificadas para cada reagente, um comutador- injetor de amostras e um registrador.

3.1.7 Produtividade, nitrogênio acumulado, relação C/N e C/F teores de fibras em detergente neutro e cinzas da biomassa

Os tratamentos foram avaliados através da colheita da biomassa do capim elefante após seis meses do plantio. A biomassa das parcelas foi pesada fresca, sem separar caule e folhas, e logo após foram retiradas sub-amostras, que em seguida, foram levadas a estufa de

secagem a 65°C até estabilização de seus pesos, quando então foi determinada a fração de matéria seca das plantas. A proporção de caule e folha presente em cada genótipo em estudo foi calculada a partir de dez plantas coletadas aleatoriamente dentro de cada parcela no momento da colheita. As amostras de plantas foram pré-moídas em moinho tipo Wiley (peneiras de 2 mm), para as análises de nitrogênio total (método semimicro Kjeldahl descrito em ALVES et al., 1994), teores de fibra em detergente neutro (FDN) e cinzas de acordo com a metodologia descrita por Van Soest (1968). O nitrogênio acumulado foi obtido pela multiplicação da matéria seca total produzida pelo teor de N nos tecidos. A relação C/N foi calculada considerando um teor de 43% de C na biomassa. Nesta ocasião, multiplicou-se a matéria seca produzida pelos teores de C e N da biomassa, e pela divisão das quantidades de C e N obtidas, obteve-se a relação C/N. A relação caule/folha foi determinada pela divisão da matéria seca de colmos pelas quantidades de folhas produzidas.

3.1.8 Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante

Neste estudo a fixação biológica de nitrogênio foi avaliada com a técnica de abundância natural de ^{15}N (UNKOVICH et al., 2008). As plantas de capim elefante dos tratamentos não fertilizados foram amostradas retirando-se a primeira folha completamente desenvolvida, denominada “folha +3”, que é utilizada para determinação do estado nutricional de cana de açúcar e também pelo fato dessa folha, de acordo com Boddey et al. (2001), apresentar um valor médio de abundância natural de ^{15}N da planta inteira em cana de açúcar, espécie da mesma família do capim elefante. Em cada parcela foram coletadas ao acaso 10 folhas. Na área do experimento foram amostradas as plantas não leguminosas de ocorrência natural na lavoura (“plantas invasoras”), para serem utilizadas como plantas testemunhas. Estas plantas foram identificadas taxonomicamente ao nível de espécie, e o número de espécies amostradas variaram em função da ocorrência das mesmas nos blocos. Neste ciclo foram utilizadas como testemunhas as espécies *Richardia brasiliensis* e *Emilia sonchifolia*.

As amostras das plantas foram moídas em moinhos do tipo Wiley e posteriormente passadas em moinho de rolagem para diminuição da granulometria das amostras (<40 mesh) (ARNOLD e SCHEPERS, 2004). Após este processamento as mesmas foram analisadas para a determinação da abundância natural de ^{15}N utilizando um espectrômetro de relação de massa isotópica de fluxo contínuo (espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus acoplado a um auto-analisador de C e N total Carlo Erba EA 1108 – Finnigan MAT, Bremen, Alemanha).

O cálculo da contribuição percentual da FBN para a nutrição nitrogenada das plantas de capim elefante foi realizado aplicando-se a fórmula:

$$\% \text{ FBN} = ((\delta^{15}\text{N PCNF} - \delta^{15}\text{N PTF}) \times 100) / (\delta^{15}\text{N PCNF} - \text{B})$$

Onde:

$\delta^{15}\text{N PCNF}$ – Valor de $\delta^{15}\text{N}$ do solo obtido através de plantas controle não fixadoras, utilizadas como referência.

$\delta^{15}\text{N PTF}$ - Valor de $\delta^{15}\text{N}$ da planta teste fixadora de N_2 (capim elefante).

B – Valor da discriminação isotópica de ^{15}N feita pelas plantas durante o processo de FBN (neste estudo, foi considerado igual a zero).

3.1.9 Poder calorífico superior em capim elefante

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa de um material. O poder calorífico divide-se em

superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado. O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (QUIRINO et al., 2005).

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado pelo método da bomba calorimétrica, e suas determinações foram realizadas em parceria com a Embrapa Florestas. O poder calorífico foi determinado em calorímetro digital (modelo C-200, IKA). Os testes realizados foram feitos segundo a norma ABNT NBR 8633/84 e manual do aparelho.

As amostras utilizadas foram escolhidas em função da concentração de N-total nos colmos e nas folhas no intuito de avaliar a influência dos teores de N do tecido sobre o poder calorífico superior do material.

3.2 Emissões de N₂O Provenientes da Aplicação da Ureia e do Sulfato de Amônio em Argissolo cultivado com Capim-elefante. Experimento II.

3.2.1 Implantação do experimento

Este estudo foi conduzido no período entre junho e dezembro de 2009 na mesma área experimental do experimento I. Com base na extração da cultura no ciclo anterior, foram adicionadas as linhas de capim-elefante os fertilizantes contendo P e K, em doses correspondentes a 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, usando-se superfosfato simples, e 60 kg ha⁻¹ de K₂O como cloreto de potássio.

Os tratamentos nitrogenados consistiram na aplicação de três doses de N-fertilizante na forma de ureia (50, 100 e 150 kg de N ha⁻¹), 100 kg de N ha⁻¹ na forma de sulfato de amônio e um controle sem N. As parcelas controle mantiveram-se as mesmas como descrito para o experimento I. Portanto, as unidades e o delineamento experimental foram os mesmos.

3.2.2 Quantificação das emissões de CO₂, N₂O e CH₄ e da volatilização de NH₃

Estas variáveis foram analisadas de acordo com as metodologias utilizadas e descritas no experimento I.

3.2.3 Cálculo dos fatores de emissão para N₂O do fertilizante

Similar ao que foi descrito para o experimento I.

3.2.4 Determinação do EPSA e dos teores de nitrato no solo

A metodologia utilizada e citada no experimento I foi a mesma utilizada neste experimento para os cálculos do EPSA. Para as análises de amônio, os métodos foram os mesmos do experimento I, no entanto para a quantificação de nitrato, as análises foram realizadas usando-se espectrofotometria em UV, utilizando um espectrofotômetro Shimadzu UV-1203.

As amostras foram analisadas de acordo com a metodologia descrita por Olsen (2008), segundo a qual as amostras são analisadas em nos comprimentos de onda 220 e 275 nm. A diferença entre a absorbância leitura em 220 nm e duas vezes a absorbância em 275 nm é proporcional à concentração de nitrato. A leitura a 275 nm foi utilizada para corrigir o desvio provocado pela presença de impurezas.

3.2.5 Produção e N acumulado na biomassa

Similar ao que foi descrito para o experimento I.

3.2.6 Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante

Neste estudo foi empregada a mesma metodologia descrita no experimento I. As testemunhas utilizadas foram as espécies *Richardia brasiliensis* e *Sida carpinifolia*.

3.3 Influência da Forma de Aplicação da Ureia, em Comparação com Sulfato de Amônio, no Balanço de Nitrogênio em Capim-elefante. Experimento III.

3.3.1 Implantação do experimento

Este estudo foi implantado em dezembro de 2009 na mesma área onde os experimentos anteriores foram realizados. Conforme descrito no experimento II foram realizadas adubações com base na extração de P e K da cultura, seguindo a recomendação de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, além de 50 kg ha⁻¹ de FTE BR12. Neste ciclo, os tratamentos testados consistiram da aplicação da dose de 80 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia enterrada e em cobertura, e esta mesma dose de N na forma de sulfato de amônio, aplicado superficialmente. As parcelas controle foram mantidas nas mesmas localidades do experimento I e II. Nos tratamentos que receberam aplicação de nitrogênio fertilizante em cobertura, a aplicação foi realizada na linha de capim-elefante, em uma única aplicação, aos 45 dias após a rebrota. As parcelas que continham os tratamentos com N-fertilizante, receberam em uma micro-parcela de 2 m², o fertilizante marcado com 1% átomos de ¹⁵N em excesso para efeito de avaliação de eficiência do uso do fertilizante nitrogenado.

3.3.2 Quantificação das emissões de N₂O, fatores de emissão para N₂O, volatilização de NH₃ e teores de NO₃ e NH₄ do solo

Todas estas variáveis foram realizadas de acordo com as metodologias descritas e utilizadas no experimento I.

3.3.3 Produção de matéria seca e nitrogênio total acumulado

Determinação conforme descrito para o experimento I.

3.3.4 Fixação biológica de nitrogênio

Neste estudo foi empregada a mesma metodologia descrita no experimento I. As espécies testemunhas utilizadas neste ciclo foram *Richardia brasiliensis* e *Sida carpinifolia*.

3.3.5 Eficiência do uso do fertilizante nitrogenado

A avaliação da eficiência do uso do fertilizante nitrogenado (EUFN) foi feita em microparcels estabelecidas dentro das parcelas de capim-elefante, cada uma correspondendo a uma área de 2 m². As plantas de capim-elefante receberam os fertilizantes nitrogenados enriquecidos com 1% de átomos de ¹⁵N em excesso. A amostragem do solo foi realizada nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Nesta ocasião foi aberta uma trincheira de 35 cm de largura e de comprimento e de 30 cm de profundidade. A porcentagem de átomos de ¹⁵N foi determinada nos colmos, nas folhas e raízes de capim-elefante. Também foi determinada no solo. A eficiência do uso do fertilizante nitrogenado (%) foi calculada pela expressão:

$$EUFN = (QNPSf/QF) \times 100$$
, em que QNPSf é a quantidade de N derivado do fertilizante presente na planta, ou no solo, e QF é a quantidade de N aplicada como fertilizante. A QNPSf foi calculada multiplicando-se a quantidade de N total da planta, ou do solo, pela porcentagem de N da planta, ou do solo, derivada do fertilizante (%NPSf). A %NPSf foi calculada pela fórmula $\%NPSf = (\%^{15}Nps/\%^{15}Nf) \times 100$, em que %¹⁵Nps é a porcentagem de átomos de ¹⁵N em excesso na planta, ou solo; e %¹⁵Nf é a porcentagem de átomos de ¹⁵N do fertilizante em excesso.

3.4 Influência da Adubação Verde e da Ureia Revestida com Polímero nas Emissões de N₂O do Solo e na Produção de Biomassa do Capim-elefante. Experimento IV.

3.4.1 Delineamento experimental e implantação dos tratamentos

Este experimento foi realizado na mesma área experimental descrita para os experimentos anteriores. Cada unidade experimental foi constituída de 5 linhas de capim elefante com 5 m de comprimento, espaçadas de 1 m. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso e cada tratamento foi constituído de 5 repetições, totalizando 20 parcelas de 25 m² cada.

Na primeira fase do experimento, os tratamentos consistiram do plantio de feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) e sorgo (*Sorghum bicolor*) para adubação verde em pré-plantio do capim-elefante. Além destes, foi reservada uma área que ficou em pousio, e determinada como controle. O período de crescimento destas espécies foi entre 20 de dezembro de 2010 (plantio das espécies) a 8 de março de 2011 (incorporação da biomassa ao solo). A incorporação da biomassa foi realizada próxima à floração do feijão de porco, equivalente a 80 DAP, dando início a segunda fase do experimento. Nesta ocasião as duas espécies foram cortadas, picadas e incorporadas ao solo com o auxílio de uma enxada rotativa. Os resíduos permaneceram em decomposição por 40 dias (9 de março a 20 de maio), onde então foi plantado o capim-elefante, iniciando a terceira etapa.

Nesta fase foram avaliados quatro tratamentos: T1. Parcela onde foi incorporada a biomassa do adubo verde; T2. 100 kg de N ha⁻¹ na forma de ureia comercial aplicada superficialmente na área que ficou em pousio da fase anterior, T3. 100 kg de N ha⁻¹ de ureia revestida com polímero aplicada nas áreas onde foi incorporada a biomassa do sorgo e T4, caracterizada por ser uma área controle e que permaneceu em pousio durante todas as fases experimentais. A aplicação da ureia foi realizada nas fileiras de capim-elefante em uma única dose aos 40 dias após o plantio do capim-elefante. A colheita da biomassa do capim-elefante foi realizada em agosto de 2011, com duração do ciclo de aproximadamente 90 dias.

3.4.2 Quantificação das emissões de N₂O

Os procedimentos para a coleta de N₂O foram realizados similarmente ao experimento I, porém com algumas modificações. Na primeira etapa do experimento, as emissões de N₂O foram monitoradas com câmaras que apresentavam uma base de metal retangular (38 x 58 cm), que foram inseridas no solo até a profundidade de 5 cm. A parte superior possuía uma canaleta, na qual era acoplado o corpo da câmara, com largura e comprimento iguais aos da base, e com uma altura de 50 cm. A altura da câmara permitiu monitorar as emissões de N₂O com as plantas em crescimento (Anexo IIA). Utilizou-se este modelo de câmara até o momento da incorporação da biomassa. Uma ventoinha, acoplada na parte interna das câmaras, foi alimentada por uma bateria e foram ligadas durante os 30 minutos de incubação em todas as amostragens. A segunda etapa durou aproximadamente 45 dias, enquanto que a terceira fase durou aproximadamente 90 dias. Na terceira fase, utilizaram-se câmaras com a mesma base, porém a parte superior da câmara (parte móvel) foi menor e possuía 10 cm de altura (Anexo IIIB).

Após a incorporação da biomassa, as avaliações de N₂O foram continuadas, utilizando-se câmaras estáticas compostas pela mesma base retangular, porém o corpo da câmara, com largura e comprimento similares aos das bases, apresentava altura de 10 cm. A vedação das câmaras, em todas as etapas, foi realizada através do preenchimento da canaleta com água. Sobre cada tampa retangular era fixada uma válvula, com abertura para acessar o conteúdo da câmara fechada, permitindo a retirada dos gases no momento da amostragem.

3.4.3 Biomassa, nitrogênio acumulado e fixação biológica de nitrogênio no feijão de porco

A produção de biomassa foi monitorada a cada 15 dias após o plantio do feijão de porco e do sorgo e foi realizada nas linhas laterais a bordadura experimental. A área correspondeu a 1m². A biomassa produzida nesta área foi pesada e sub-amostras foram retiradas para determinação do conteúdo de matéria seca, % nitrogênio e abundância natural de ¹⁵N com os mesmos procedimentos utilizados no item 3.1.8.

A avaliação da biomassa final do feijão de porco, do sorgo e das plantas espontâneas da área controle foi realizada aos 80 dias após o plantio (DAP), considerando-se as 2 linhas centrais de cada parcela, resultando em uma área de 5 m² por parcela. Após a pesagem no campo, todo o material foi espalhado de forma uniforme nas respectivas parcelas. Antes, porém, amostras foram retiradas, pesadas e levadas à estufa de secagem a 65°C até estabilização de seus pesos para determinação da fração de matéria seca das plantas. Após esta etapa, as amostras de plantas foram pré-moídas em moinho tipo Wiley (peneiras de 2 mm) e, em seguida foram pulverizadas em moinho de rolagem (ARNOLD e SCHEPERS, 2004). Posteriormente as amostras foram analisadas quanto ao teor de N-total e abundância natural de ¹⁵N para quantificação da FBN (UNKOVICH et al., 2008).

Para a contribuição da FBN no feijão de porco levou-se em consideração um valor B de -1 (BODDEY et al., 2000). Nesta avaliação as plantas de sorgo foram utilizadas como plantas controle.

3.4.4 Fixação biológica de nitrogênio no capim-elefante

Para a quantificação da FBN em capim-elefante, foi empregada a mesma metodologia descrita no experimento I. As testemunhas utilizadas neste ciclo foram *Arnica montana* e *Emilia sonchifolia*.

3.4.5 Quantificação da volatilização de NH₃

Esta quantificação foi realizada somente após a fertilização nitrogenada, e foi realizada de acordo com a metodologia descrita no experimento I.

3.4.6 Determinação dos fatores de emissão, EPSA, teores de nitrato e amônio e umidade do solo

Todas estas determinações foram realizadas de acordo com o que foi descrito no experimento I.

3.4.7 Produção de matéria seca e nitrogênio total acumulado no capim-elefante

Os procedimentos foram similares a metodologia descrita no experimento I.

3.4.8 Análises estatísticas

Os gráficos que demonstram a variação dos fluxos do CO₂, CH₄ e N₂O pelo tempo foram feitos utilizando a média de cada amostragem e respectivo erro padrão da média. Nos dados de emissões acumuladas dos CO₂, CH₄ e N₂O 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 dos tratamentos com análise de regressão nas fontes de variação quantitativas (doses de N) e teste de LSD com 5% de probabilidade para variáveis qualitativas (fontes e forma de aplicação da ureia). As relações entre os fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O e dados das variáveis de solo foram testadas pelo uso de correlação de Pearson a 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS

4.1 Emissões de GEE Derivadas do Preparo do Solo e da Fertilização Nitrogenada em Capim-elefante. Experimento I

4.1.1 Emissões de CO₂

Os fluxos de CO₂ aumentaram após o preparo do solo (Figura 1). Nesta área, os fluxos alcançaram picos que corresponderam a 2,5 g de CO₂ m⁻² h⁻¹, enquanto que, na área determinada como controle os fluxos de CO₂ não superaram 0,6 g CO₂ m⁻² h⁻¹, fluxos de magnitude semelhantes aos encontrados por La Scala et al. (2006), em área de cana-de-açúcar no Sudeste, com solo preparado por método convencional (maiores fluxos de CO₂) e em áreas de pousio. Após 60 dias da primeira etapa de preparo do solo, foi observada uma tendência de diminuição das diferenças entre os fluxos de CO₂ da área controle e da área preparada convencionalmente. Após a aplicação das doses dos fertilizantes nitrogenados, não foi observada diferença significativa para os fluxos de CO₂ na comparação entre o tratamento controle com os demais. Durante este período a precipitação acumulada foi de 1434 mm e temperatura média do ar de 25°C.

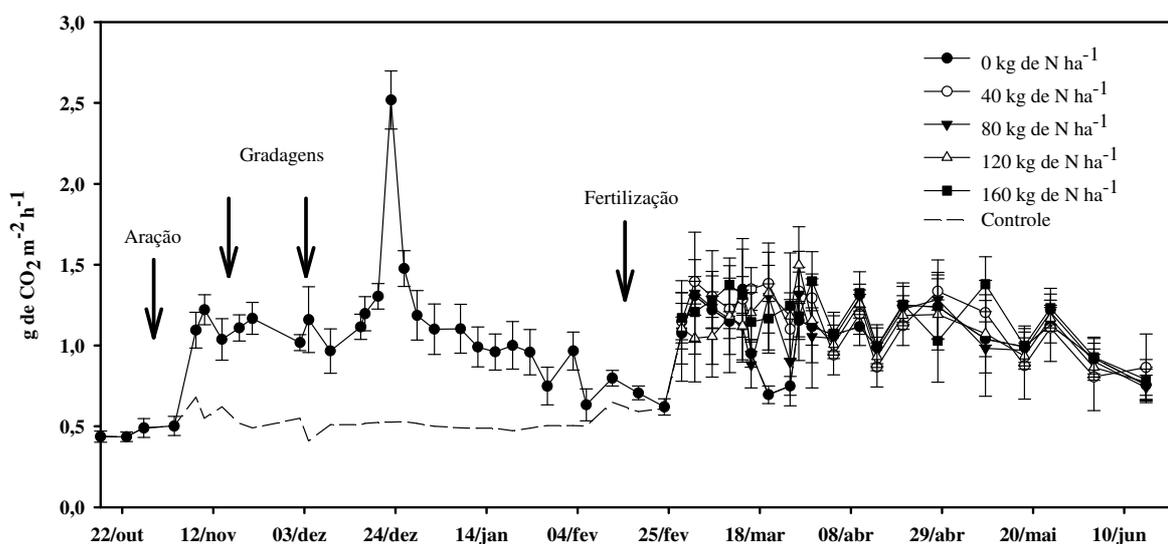


Figura 1. Emissões de CO₂ do solo da área preparada convencionalmente e da área controle. As setas representam as três etapas de preparo do solo e a fertilização.

4.1.2 Emissões de CH₄

Durante as etapas de preparo do Argissolo, as chuvas foram freqüentes e de alta intensidade Figura 2. Fluxos de CH₄ de baixa magnitude foram observados ao longo do período, chegando a valores bem elevados no período de maior intensidade de chuvas, quando o solo se encontrava visivelmente saturado, com alguns locais exibindo lâminas d'água. Exceto na fase em que o solo estava saturado, os resultados aqui apresentados raramente ultrapassaram 15 µg de C-CH₄ m⁻² h⁻¹, excetuando-se o período ente os dias 22 e 29 de janeiro quando picos de emissão de CH₄ superiores a 30 µg de CH₄ m⁻² h⁻¹ foram observados. Após esta etapa os fluxos de CH₄ voltaram a níveis inferiores a 10 µg de CH₄ m⁻² h⁻¹, inclusive durante o período pós-fertilização, indicando não haver efeito da fertilização nitrogenada sobre as emissões de CH₄. No entanto, em nenhum momento, foram observados fluxos negativos, ou consumo de CH₄ no solo, indicando que o solo mantinha-se com pontos sob baixo potencial redox ao longo do monitoramento.

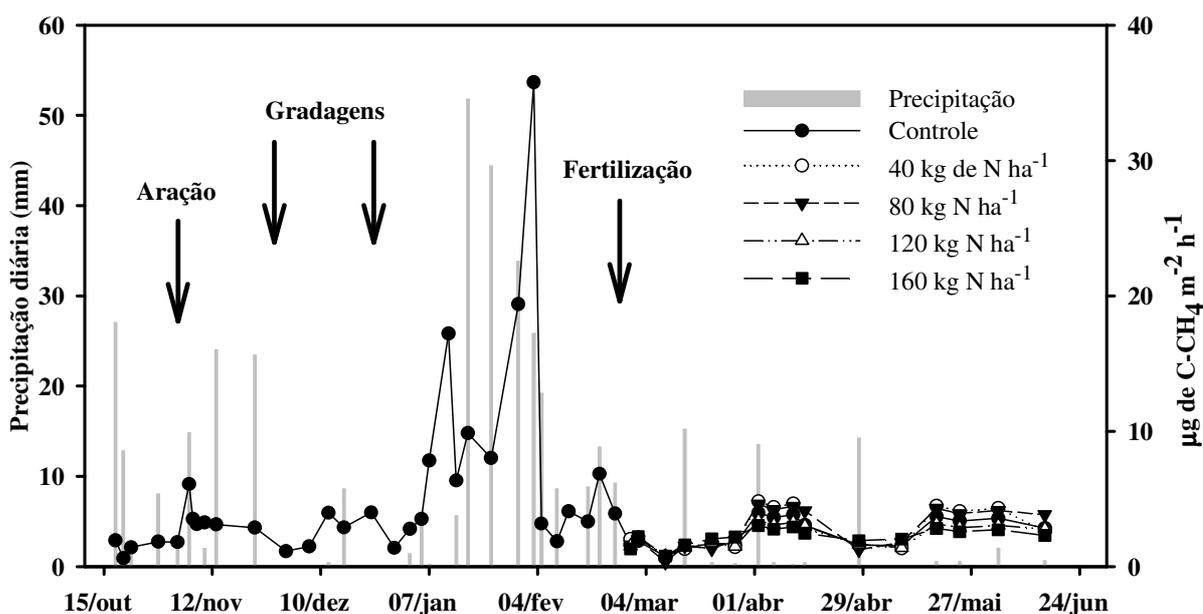


Figura 2. Precipitação e emissões de CH₄ do solo da área preparada convencionalmente. As setas representam as três etapas de preparo do solo.

4.1.3 Emissões de N₂O

As maiores emissões de N₂O foram observadas após o preparo do solo, em meados dos meses de dezembro e janeiro, quando também foram observados os maiores índices pluviométricos da região (Figura 3). Os fluxos observados após as gradagens superaram 430 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹.

Emissões significativas também ocorreram após 11 dias da aplicação do fertilizante nitrogenado. As emissões de N₂O aumentaram com as doses de fertilizantes aplicadas, sendo encontrado o maior fluxo, de 440 µg N m⁻² h⁻¹, com a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N. Na segunda semana de março, ocorreu um incremento nos fluxos de N₂O para todas as quatro doses de N-fertilizante aplicadas. Este incremento ocorreu justamente após a primeira chuva que ocorreu no experimento (16 mm). Posteriormente, novos eventos de precipitação foram observados, aumentando ainda mais os fluxos de N₂O. Nos meses abril, maio e junho até a colheita do capim, mesmo havendo eventos de precipitação que superaram 30 mm, as emissões de N₂O estabilizaram-se em níveis inferiores a 30 µg de N-N₂O m⁻² h⁻¹. Os valores de EPSA acompanharam os índices de precipitação e estiveram próximos de 60 % em média na fase inicial do experimento. Após o período da aplicação do fertilizante, foi observado que os valores de EPSA ficaram entre 25% a 50%, raramente superando 60 %. Não foram observadas grandes variações de temperatura no período estudado. A temperatura do ar e do solo foi em média de 25 e 27,7° C respectivamente.

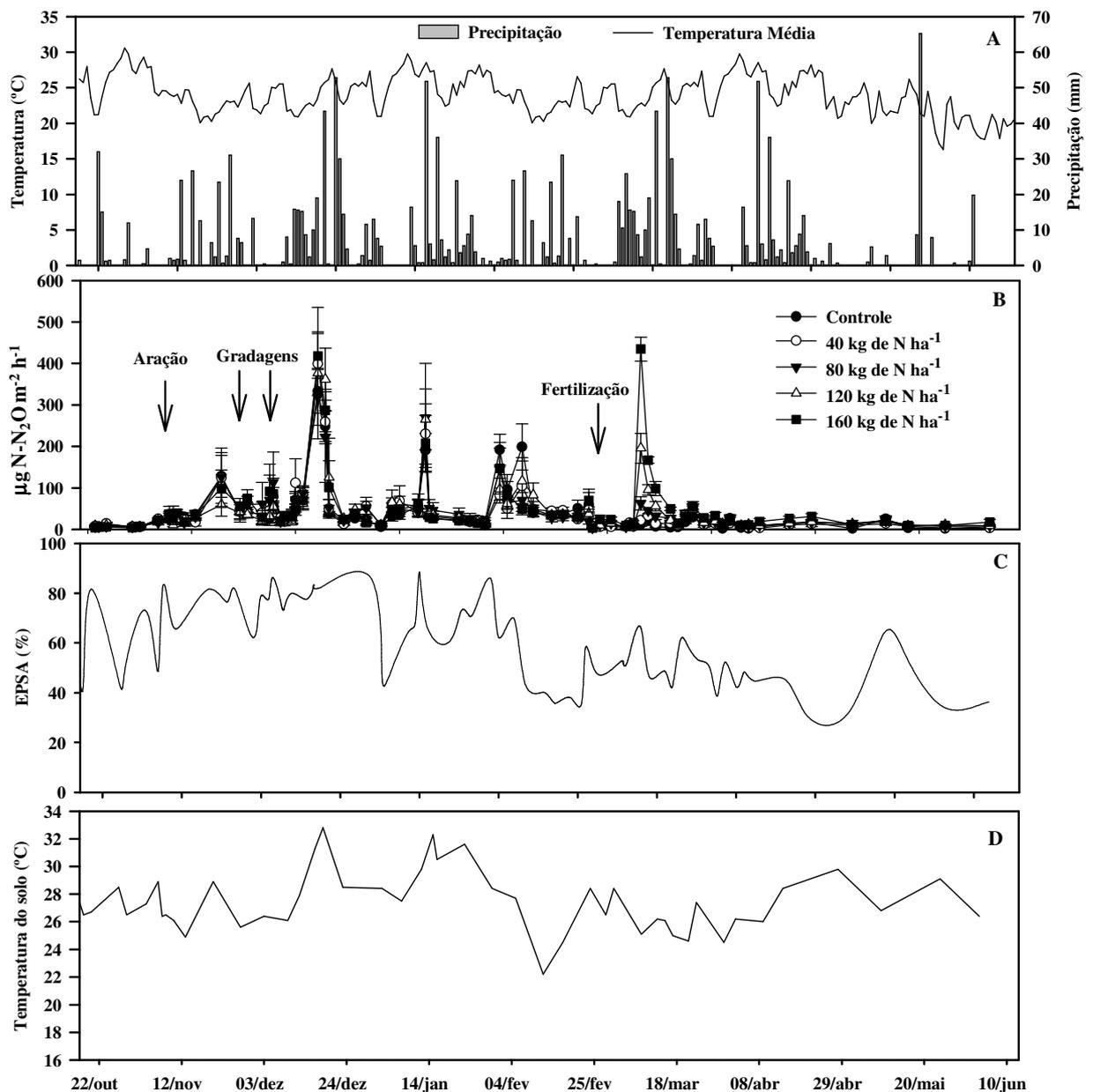


Figura 3. Precipitação, temperatura do ar (A), emissão de N_2O (B), espaço poroso saturado por água (EPSA) (C) e temperatura do solo (D) durante o período de preparo do solo até a colheita do capim-elefante cultivado com quatro doses de N-fertilizante aplicadas na forma de ureia. As setas representam as datas das três etapas de preparo do solo e da aplicação de N-fertilizante (aração, duas gradagens e aplicação das doses de N-fertilizante).

A diferença das emissões nas etapas de preparo do solo e entre os tratamentos fertilizados e não fertilizados pode ser justificada pelo aumento da disponibilidade de N no solo (Figura 4). Os teores de NH_4^+ e NO_3^- mantiveram-se constantes na área controle durante toda a fase experimental. Após os eventos de preparo do solo, especialmente após as gradagens, as concentrações de NH_4^+ e NO_3^- elevaram-se. Da mesma forma, houve aumento das concentrações de NH_4^+ e NO_3^- após a fertilização nitrogenada. Um mês após a aplicação dos fertilizantes, os teores diminuíram significativamente e igualaram-se ao tratamento controle, tendência que também foi observada para os fluxos de N_2O do solo (Figura 3).

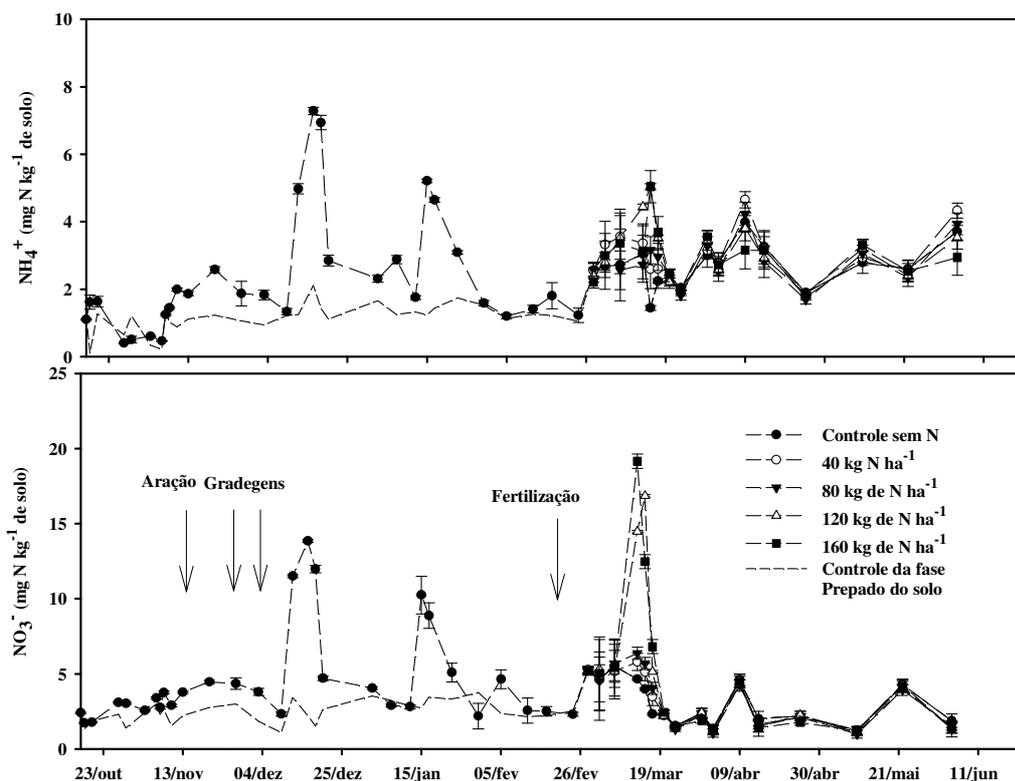


Figura 4. Teores de NO_3^- e NH_4^+ do solo antes e após o preparo do solo e da aplicação de N-fertilizante. As setas representam as datas das três etapas de preparo do solo e da aplicação de N-fertilizante na forma de ureia (Aração, Gradagens e aplicação das doses de N-fertilizante).

4.1.4 Fatores de emissão de N_2O para os fertilizantes

A emissão de N_2O acumulada durante o período estudado no tratamento controle foi de $0,263 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$. Descontando-se esta emissão acumulada, das obtidas com a aplicação dos tratamentos fertilizados, observou-se que as emissões acumuladas foram de $0,07$, $0,17$, $0,27$ e $0,60 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ para as doses de 40 , 80 , 120 e 160 kg ha^{-1} de N respectivamente (Figura 5). Considerando-se as doses de ureia aplicadas, calcularam-se fatores de emissão de $0,18$, $0,22$, $0,23$ e $0,37 \%$ respectivamente.

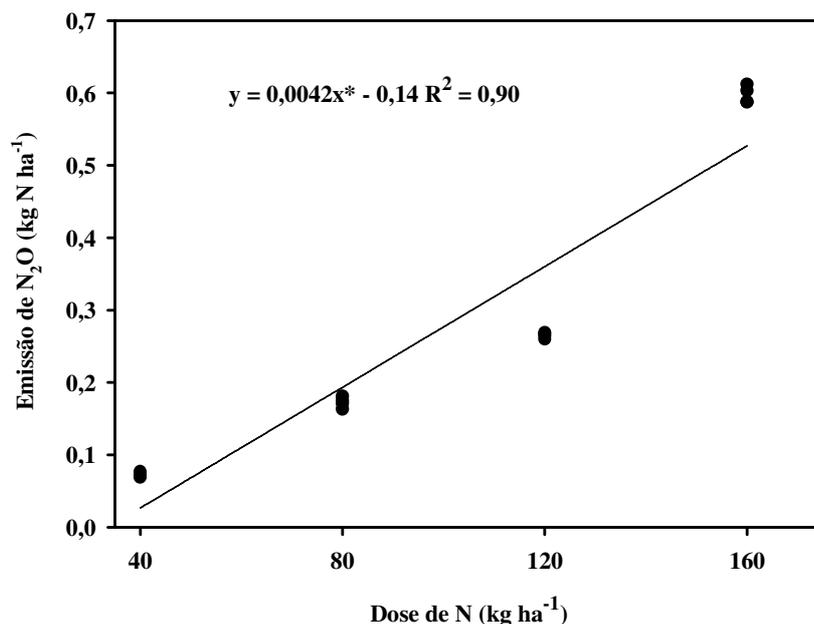


Figura 5. Regressão linear entre as emissões acumuladas de N₂O com quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia aplicadas em um Argissolo cultivado com capim-elefante.

4.1.5 Volatilização de amônia derivada das doses de N-fertilizante

As perdas por volatilização de NH₃ aumentaram proporcionalmente com as doses aplicadas, chegando-se aos totais de 25, 43, 65 e 88 kg ha⁻¹ de N-NH₃ para as doses de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, respectivamente (Figura 6). Em média, as perdas corresponderam a 58% do N aplicado. As avaliações foram feitas em 3 períodos consecutivos, sendo que mais de 90 % do N volatilizado foi detectado após o primeiro período de 3 dias.

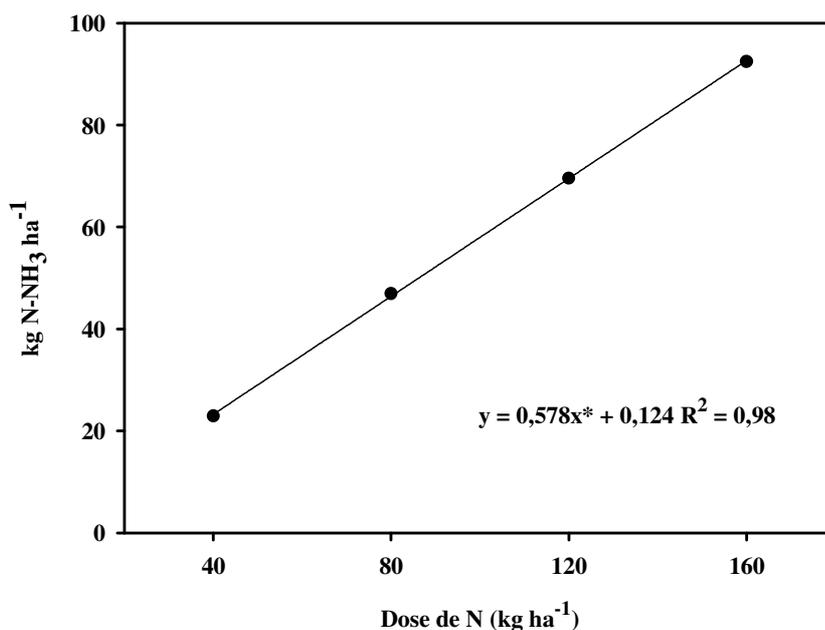


Figura 6. Regressão linear entre a quantidade de N perdida por volatilização de N-NH₃ (kg ha⁻¹) com quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia aplicadas em um Argissolo cultivado com capim-elefante.

Um dia antes da fertilização nitrogenada, ocorreu uma chuva de 25 mm (Figura 7), que pode ter favorecido a atividade da urease, enzima que catalisa a hidrólise da ureia para dióxido de carbono e amônia. No entanto, nos 10 dias subsequentes à aplicação da ureia, não ocorreram chuvas. Por isso, no período de avaliação o solo apresentou baixos valores de EPSA, próximos a 40%. A temperatura média do ar manteve-se entre 25 a 28 °C em todo o período das avaliações.

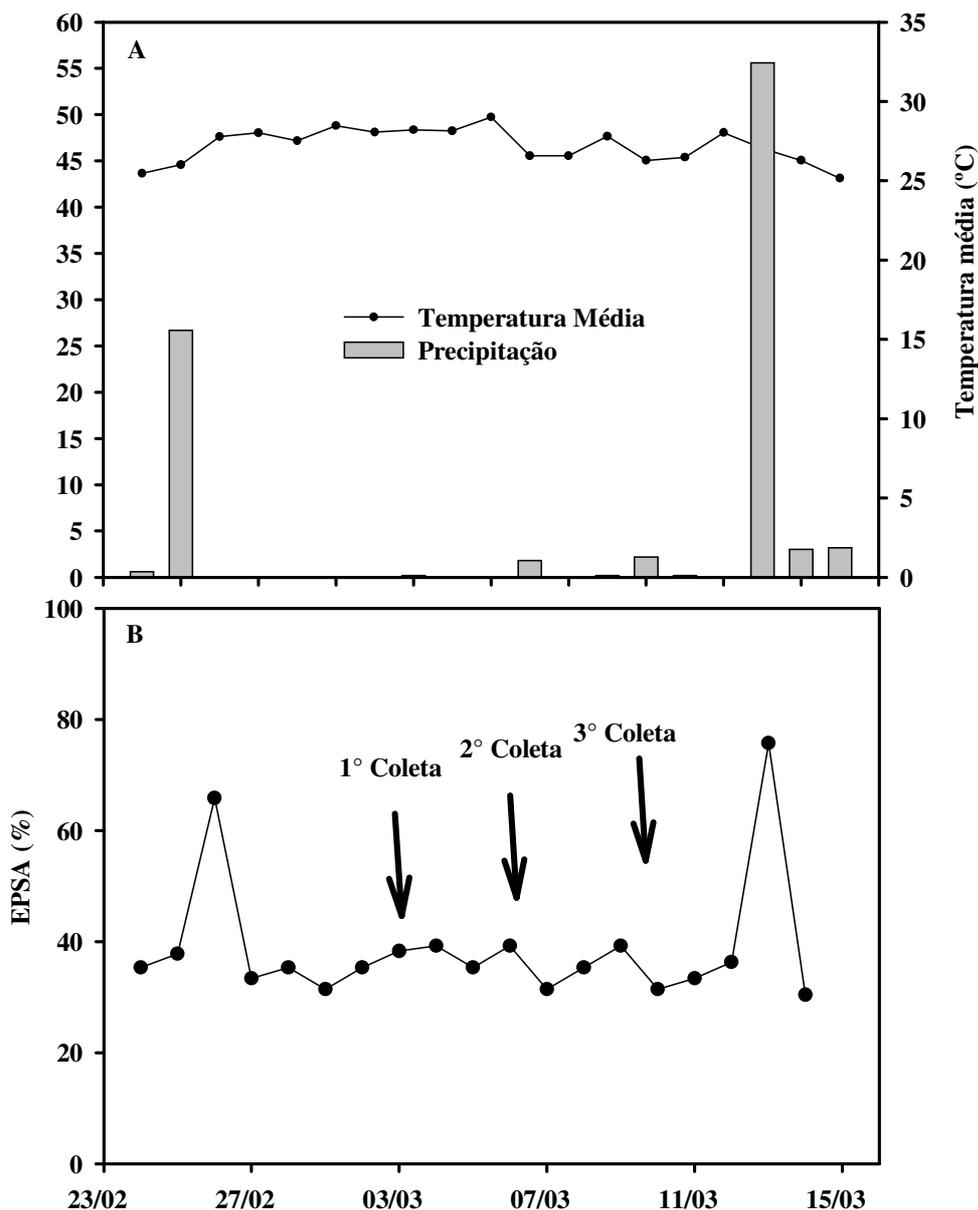


Figura 7. Precipitação diária, temperatura do ar (A) e umidade do solo (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de experimentação. As setas representam as datas das coletas realizadas.

4.1.6 Produção e nitrogênio total acumulado na biomassa

A produção de matéria seca total das plantas neste ciclo (6 meses) foi de 21, 28, 29, 28 e 27 Mg ha⁻¹ para os tratamentos controle, e fertilizados com 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N respectivamente. Foi observado ajuste polinomial quadrático significativo para produção de colmos e total (colmos + folhas) de capim-elefante em relação às doses de ureia aplicadas (Figura 8). Observou-se que quando as doses de ureia superaram 80 kg ha⁻¹ de N, não existiram respostas equivalentes de produção de matéria seca. Descontando-se a matéria seca do controle (sem N), a maior produção de matéria seca por unidade de N-fertilizante aplicado foi observada com a utilização da dose de 40 kg ha⁻¹ de N, com valor de 167 kg MS por kg de N fertilizante aplicado. Para as doses de 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, os acúmulos de matéria seca por kg de N-fertilizante aplicada foram de 99, 56 e 37 kg MS por kg de N fertilizante aplicado respectivamente.

Considerando os resultados da análise de regressão da produção de biomassa total, pode-se observar que a dose ideal de ureia para o capim-elefante foi de 96 kg ha⁻¹ de N.

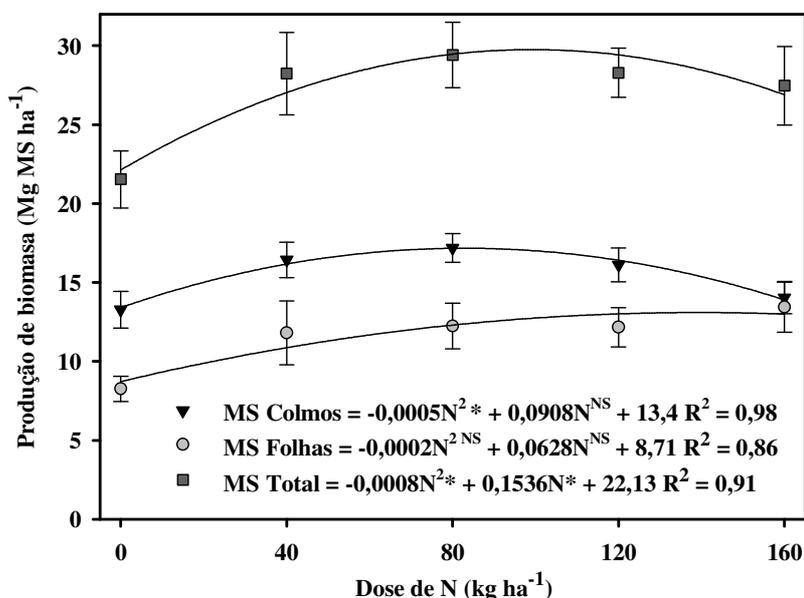


Figura 8. Produção de colmos, folhas e total do capim-elefante cultivado com quatro doses de N-fertilizante aplicadas como ureia. *Ajuste significativo a 5% de probabilidade. ^{NS}Não significativo.

Os resultados mostram um acúmulo de N na biomassa com polinomial quadrático significativo a 5% de probabilidade para colmos e total (colmos + folhas). Nos colmos, os valores não superaram 70 kg ha⁻¹ de N, enquanto que para folhas estes valores foram de 175, 184, 197 e 200 kg ha⁻¹ de N para as doses de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, respectivamente (Figura 9). Para o total de N acumulado na biomassa (colmos + folhas), também foi observado ajuste linear significativo para as doses de N aplicadas.

Descontando-se o nitrogênio acumulado na biomassa do capim-elefante controle (não fertilizado), observou-se um acúmulo adicional de 25, 34, 48 e 50 kg ha⁻¹ de N para as doses de 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ de N respectivamente. De acordo com estes resultados, a eficiência da fertilização foi diferenciada entre as doses e corresponderam a 65, 42, 39 e 31 % respectivamente. Estes resultados, associados aos obtidos com a produtividade de biomassa, indicam que, nas condições experimentais deste estudo, a dose ideal de ureia a ser aplicada é

de 96 kg ha⁻¹ de N. Doses superiores a 96 kg ha⁻¹ de N acarretam em maior acúmulo de N, sem ganhos de produtividades.

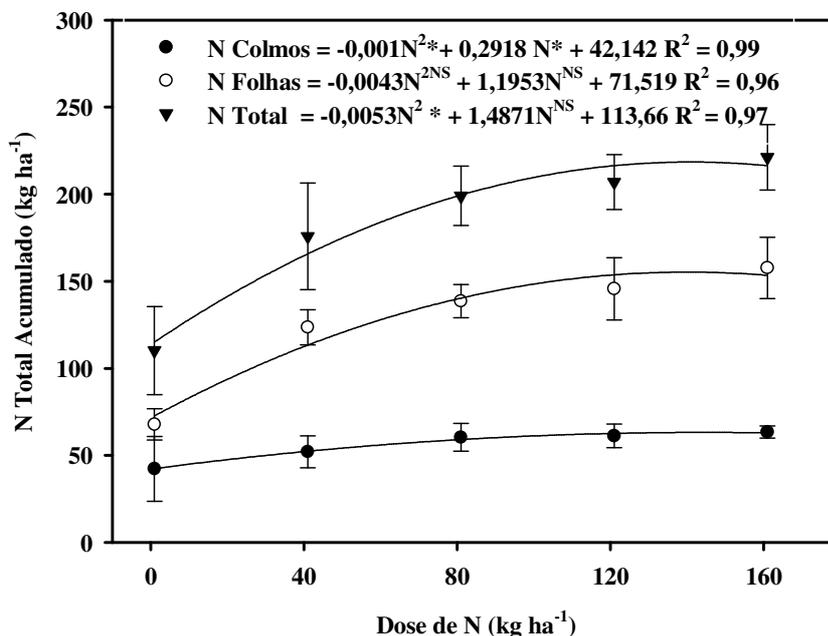


Figura 9. Nitrogênio total acumulado em colmos e folhas em capim-elefante cultivado sob a aplicação de quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia. * Ajuste significativo a 5% de probabilidade. ^{NS} Não significativo.

4.1.7 Fixação biológica de nitrogênio

Através dos valores de $\delta^{15}N$ do capim-elefante e das plantas testemunhas foi possível calcular a FBN neste ciclo. Esta medição foi realizada no tratamento controle. Utilizaram-se como plantas testemunhas neste ciclo às espécies *Richardia brasiliensis* e *Emilia sonchifolia* que apresentaram $\delta^{15}N$ de 12,1 e 11 respectivamente. O capim-elefante apresentou $\delta^{15}N$ de 8,5 e por isso a FBN média neste ciclo foi de 26%.

4.1.8 Parâmetros qualitativos da biomassa

Os teores de FDN nos colmos mantiveram-se entre 65 e 70 % do total da biomassa e não foi observado efeito significativo do aumento das doses de ureia aplicadas (Figura 10). Para a produção de folhas, o aumento na disponibilidade de N do solo não diminuiu significativamente os teores de FDN dos tecidos com ajuste linear a 5% de probabilidade. O aumento das doses de ureia não acarretou em uma diminuição significativa dos teores de FDN dos colmos e das folhas.

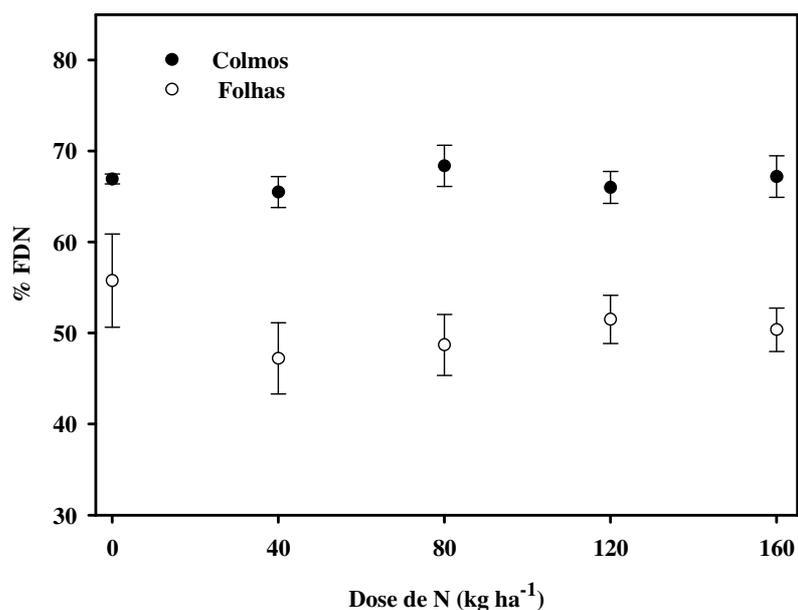


Figura 10. Teores de fibra em detergente neutro (FDN) do genótipo de capim-elefante Cameron em função de quatro doses de N-fertilizante na forma de ureia. ^{NS} Não significativo.

O incremento das doses de ureia acarretou em um maior acúmulo de N pelas plantas e uma maior produção de folhas em relação aos colmos (Figura 11). Menores valores de relação C/N foram observados com o aumento das doses, com exceção da dose de 40 e 80 kg ha⁻¹ de N, porém, o ajuste linear da análise de regressão apenas foi significativo para a relação Caule/Folha.

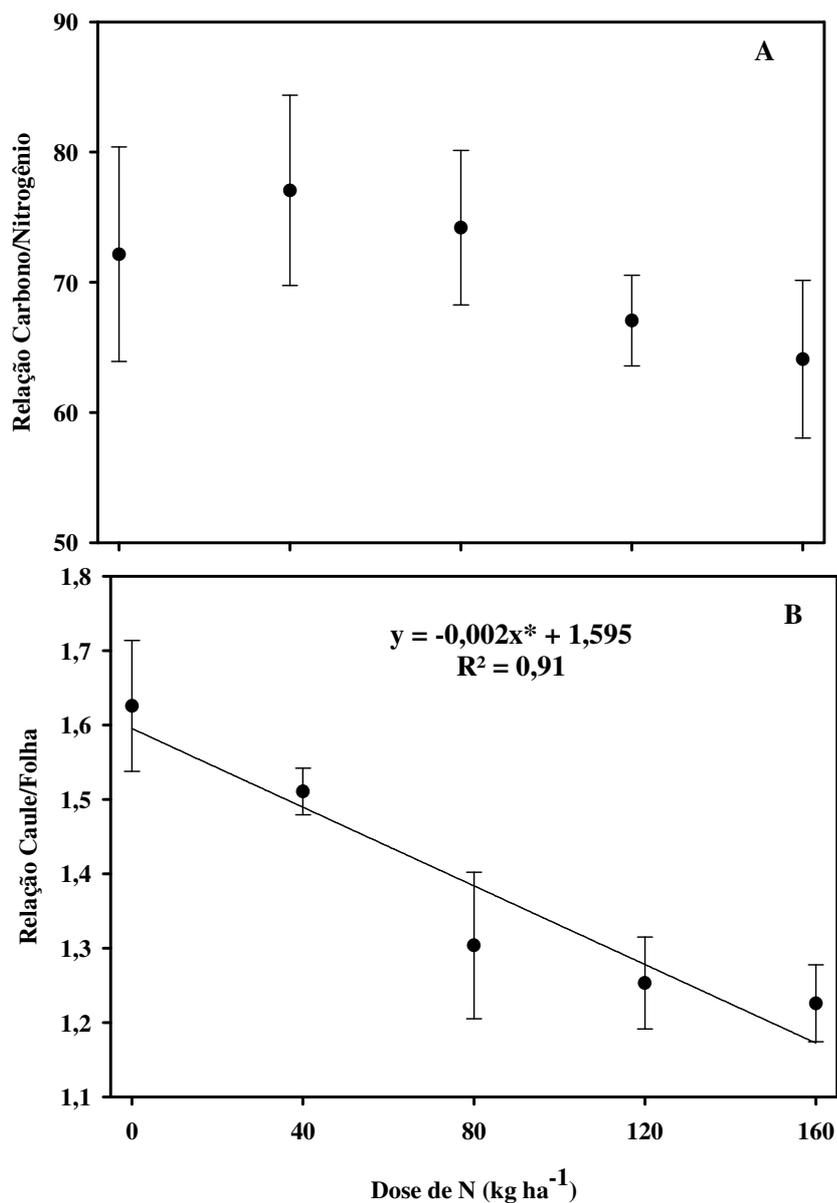


Figura 11. Relações Carbono/Nitrogênio (A) e Caule/Folha (B) do genótipo de capim-elfante Cameroon em função de quatro doses de N-fertilizante aplicadas como ureia. ^{NS} Não significativo.

Menores relações C/N e C/F não necessariamente comprometem o potencial desta espécie na geração de bioenergia. O poder calorífico da biomassa não variou de forma significativa com o aumento do conteúdo de N dos colmos e folhas do capim (Figura 12). Nos colmos, o valor médio foi de 4300 kcal kg⁻¹ enquanto que para folhas foi de 4150 kcal kg⁻¹. O aumento da concentração de N nos tecidos não influenciou de forma significativa o poder calorífico das amostras.

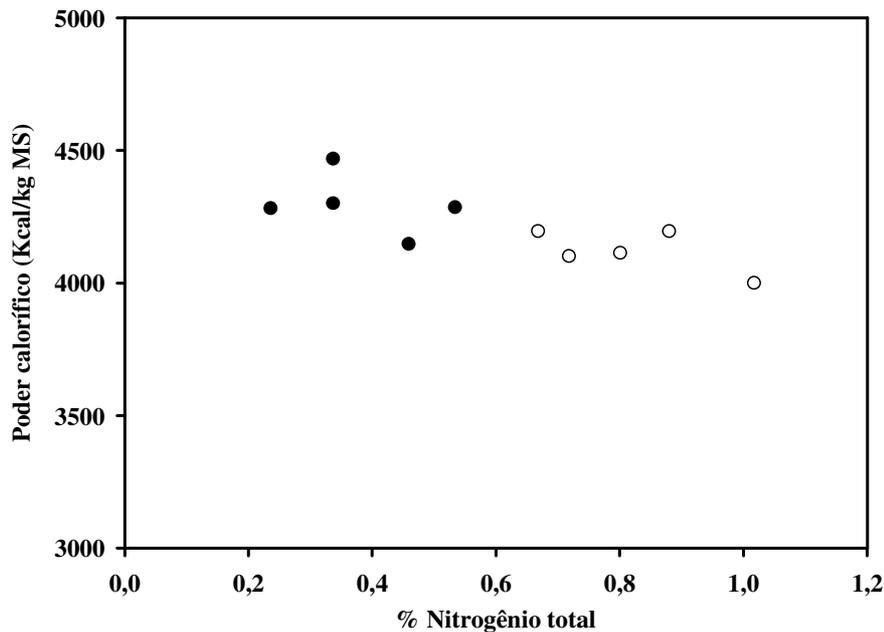


Figura 12. Poder Calorífico Superior (PCS) em função das concentrações de nitrogênio nos colmos e folhas de capim elefante.

4.2 Emissões de N₂O Provenientes da Aplicação de Duas Fontes de Nitrogênio Fertilizante: Ureia e Sulfato de Amônio. Experimento II.

4.2.1 Emissão de N₂O, EPSA e variáveis climáticas

A variação temporal de N₂O durante todo o estudo foi caracterizada por baixos fluxos ($< 20 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$), interrompidos por alguns períodos de fluxos mais altos, com duração de no máximo 20 dias, que ocorreram após a fertilização nitrogenada, sendo o fluxo máximo encontrado de $436 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$. A resposta à fertilização não foi imediata, provavelmente devido à baixa umidade (EPSA próximo de 40 %) encontrada no período da aplicação dos fertilizantes. A primeira precipitação ocorreu três dias após a fertilização, quando houve um significativo aumento nos fluxos de N₂O (Figura 13). O aumento dos fluxos de N₂O foi proporcional às doses de ureia aplicadas. Quando o fertilizante foi aplicado na forma de sulfato de amônio, as emissões de N₂O mantiveram-se abaixo de $176 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, sendo os maiores fluxos restritos aos mesmos períodos observados para a fertilização com ureia. No restante do tempo, os fluxos ficaram na faixa de 0 e $20 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$.

A temperatura do ar parece que foi o fator que menos influenciou as emissões de N₂O (Figura 13). Houve pouca oscilação, ficando em torno de 25°C. Durante os períodos chuvosos, a temperatura foi mais baixa, com média de 22°C. Em junho e julho pode-se observar que a temperatura do ar esteve um pouco abaixo do restante do período, com valores médios diários próximos de 23°C. A temperatura do solo também variou no período com uma tendência de maiores temperaturas nos meses de outubro, novembro e dezembro.

O espaço poroso do solo saturado com água (EPSA) variou de 16 a 65% durante o estudo. Em grande parte do período experimental o EPSA permaneceu acima de 50%, devido à alta frequência com que as chuvas ocorreram. Nos períodos entre 2 a 20 de setembro e entre 18 de novembro e 10 de dezembro, também ocorreram precipitações significativas, elevando

os valores de %EPSA, porém os fluxos de N_2O não foram influenciados e mantiveram-se constantes.

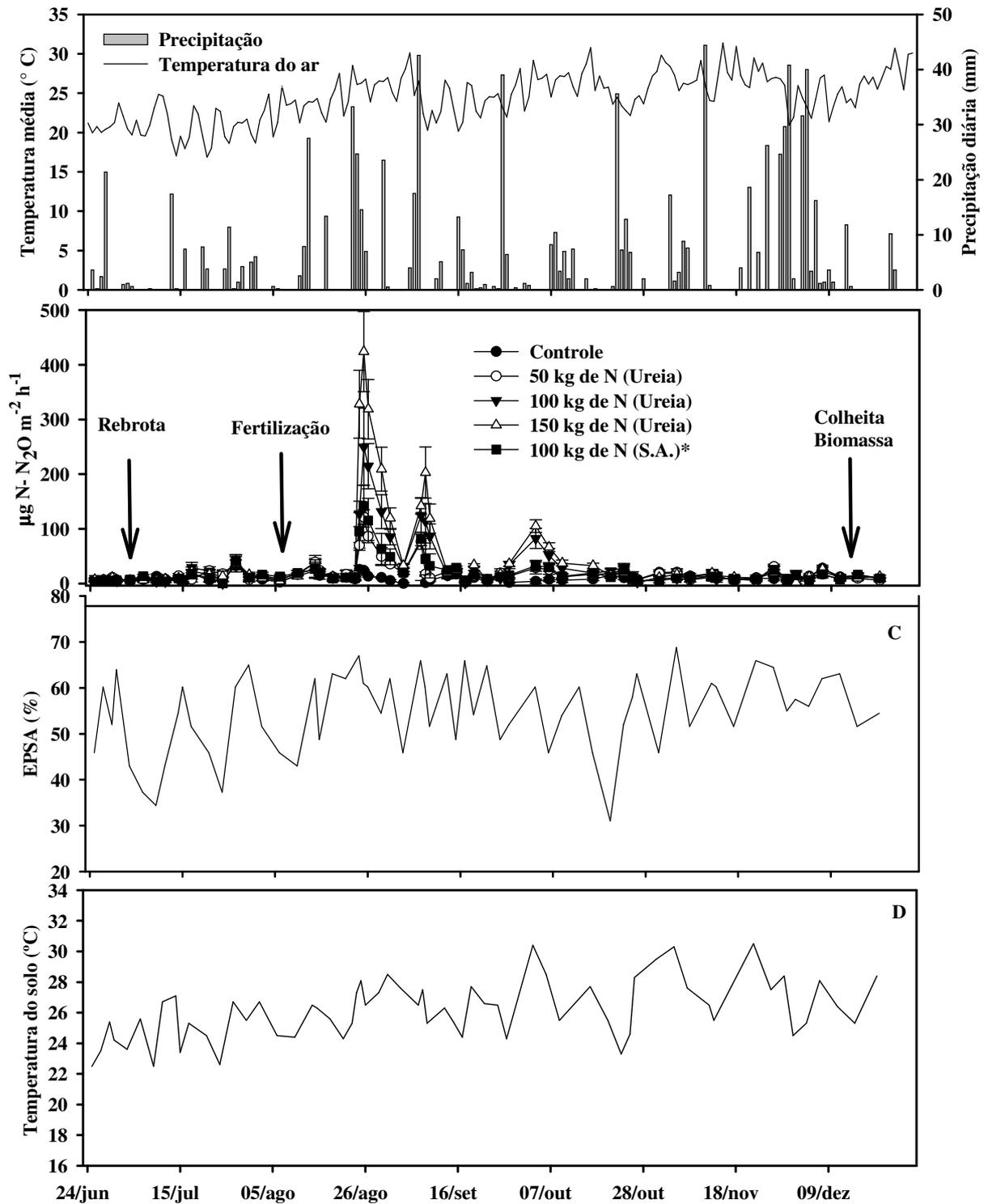


Figura 13. Precipitação diária e temperatura média do ar (A), espaço poroso saturado por água (B) e emissões de N_2O (C) derivadas da aplicação de diferentes doses e fontes de N-fertilizante em solo plantado com a cultura do capim elefante, em Seropédica-RJ.*S.A. Sulfato de Amônio.

Os teores de NO_3^- e NH_4^+ do solo aumentaram significativamente entre o período de 20 de agosto a 20 de setembro, que compreendeu o evento após a fertilização das plantas (Figura 14). Os teores de NO_3^- e NH_4^+ do solo passaram de 7 mg N kg^{-1} solo a aproximadamente 20 mg N kg^{-1} solo após a fertilização. Trinta dias após a fertilização, os teores de N mineral não variaram significativamente e mantiveram-se abaixo de 10 mg N kg^{-1} solo.

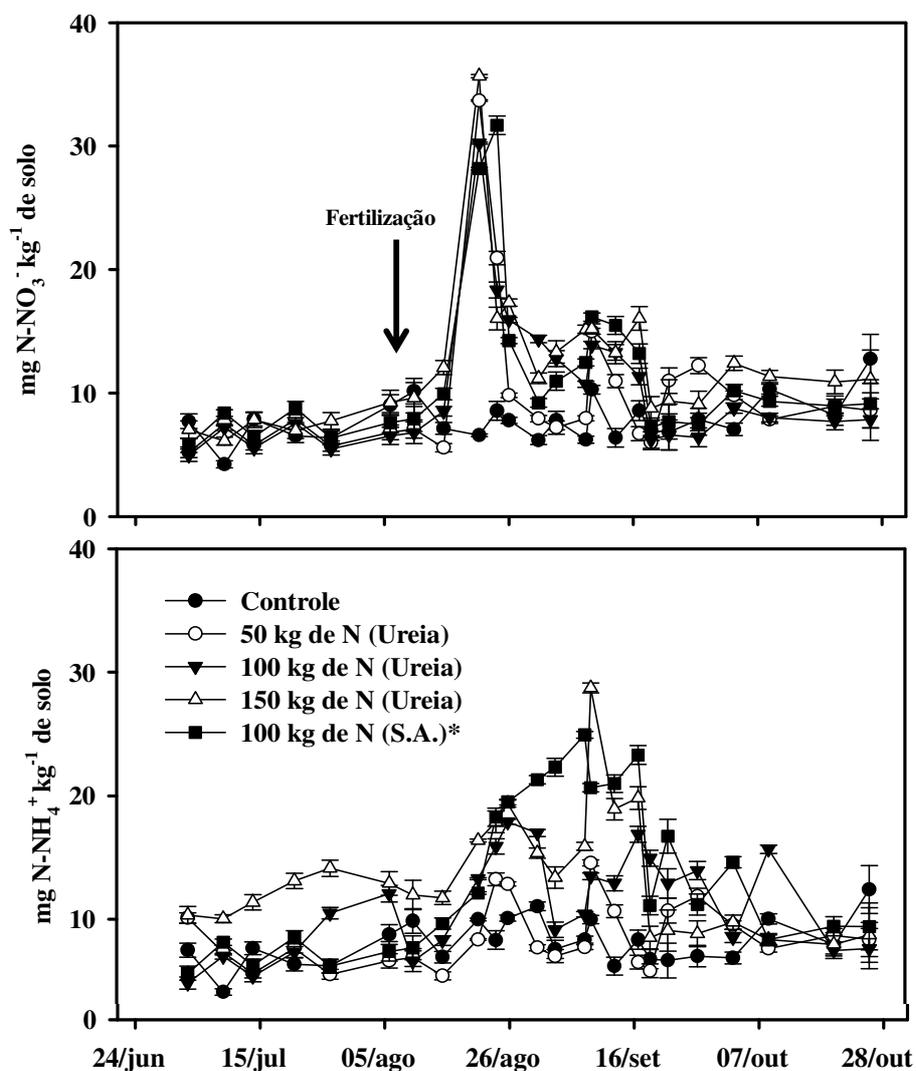


Figura 14. Teores de NO_3^- (A) e NH_4^+ (B) do solo antes e após a aplicação de doses e fontes de N-fertilizante. A seta representa a data da aplicação de N-fertilizante. *S.A. Sulfato de Amônio.

4.2.2 Fatores de emissão para N_2O das duas fontes de N-fertilizante aplicadas

Considerando-se os 170 dias de monitoramento dos fluxos de N_2O , encontrou-se uma emissão acumulada para a área controle de $78 \text{ g de N-N}_2\text{O ha}^{-1}$. Descontando-se essa quantidade das obtidas nas áreas tratadas com fertilizante, encontraram-se emissões líquidas de N_2O induzidas pelo uso de N, de 140, 408 e $493 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$, respectivamente para as doses de 50, 100 e 150 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, e de $96 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ onde se adicionou sulfato de amônio (Tabela 4).

Os fatores de emissão direta de N₂O foram de 0,25 %, 0,35 %, 0,33 % para as doses de ureia de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, enquanto que para sulfato de amônio (100 kg ha⁻¹ de N) foi de 0,11% (Tabela 4), sendo observada diferença estatística significativa. O menor fator de emissão foi observado quando se utilizou sulfato de amônio, que diferiu significativamente das doses aplicadas na forma de ureia, porém entre as doses de ureia não houve diferenças significativas.

Tabela 4. Fatores de emissão de N₂O provenientes da aplicação de três doses de N-fertilizante na forma de ureia e uma dose na forma de sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.

Fonte/Dose de fertilizante* kg de N ha ⁻¹	Emissão de N ₂ O	Fator de emissão (%)**
50 (U)	0,140 b	0,28 a
100 (U)	0,408 a	0,41 a
150 (U)	0,493 a	0,33 a
100 (S.A)	0,096 b	0,10 b

*U. Ureia e S.A. sulfato de Amônio
 **100 x [(kg N₂O tratamento - kg N₂O testemunha)/kg N aplicado];
 médias de fator de emissão seguidas pela mesma letra indicam ausência de diferença segundo o teste de LSD (p=5%).

4.2.3 Volatilização de amônia derivada das fontes de N-fertilizante

As perdas de N-NH₃ variaram entre 30 e 47 % das doses de N aplicadas na forma de ureia, e foi de 15 % da dose de N na forma de sulfato de amônio (Figura 15). Do total da NH₃ volatilizada, praticamente 90 % ocorreram durante os três primeiros dias após a aplicação (1^a coleta). A ocorrência de chuvas (13 mm) no dia da aplicação do fertilizante elevou os valores de EPSA a 55 % (Figura 16), o que contribuiu para dissolver e possivelmente percolar parte da ureia aplicada. No entanto, nos 6 dias subsequentes, não foram detectadas chuvas e por isso o EPSA do solo diminuiu para valores abaixo de 40 %. Neste caso, a interrupção das chuvas pode ter favorecido o aumento das perdas na forma de NH₃. Após a segunda coleta de amônia, realizada no dia 23/8, ocorreu uma chuva de 30 mm, mas parece não ter influenciado as perdas por volatilização de NH₃ uma vez que na terceira coleta as perdas foram muito baixas.

As perdas de NH₃ acompanharam o aumento das doses de ureia aplicadas. Quando foi utilizado o sulfato de amônio, as perdas por volatilização foram diminuídas em 70 % quando comparados às perdas provenientes da mesma dose na forma de ureia (Figura 15).

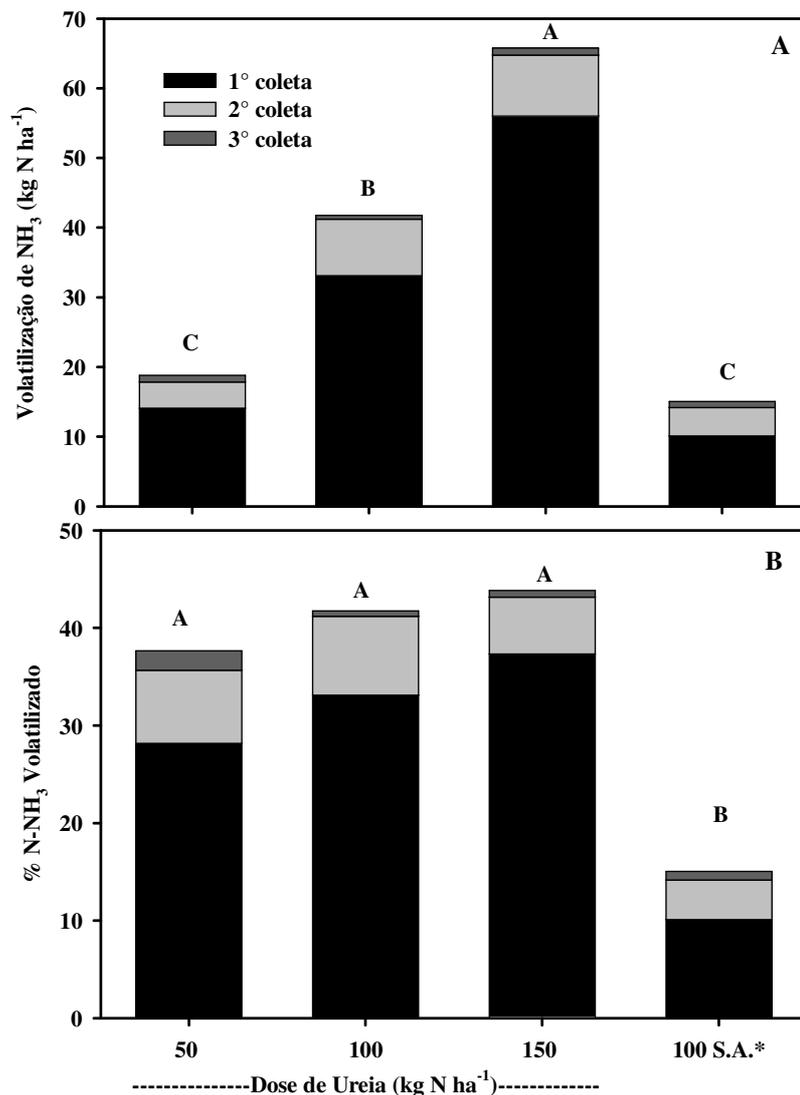


Figura 15. Quantidade de N-NH_3 volatilizada (A) e proporção volatilizada do total de N aplicado (B) nas doses de 50, 100 e 150 kg ha^{-1} de N na forma de ureia, e na dose de 100 kg ha^{-1} de N na forma de sulfato de amônio*, em um Argissolo cultivado com capim-elefante. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

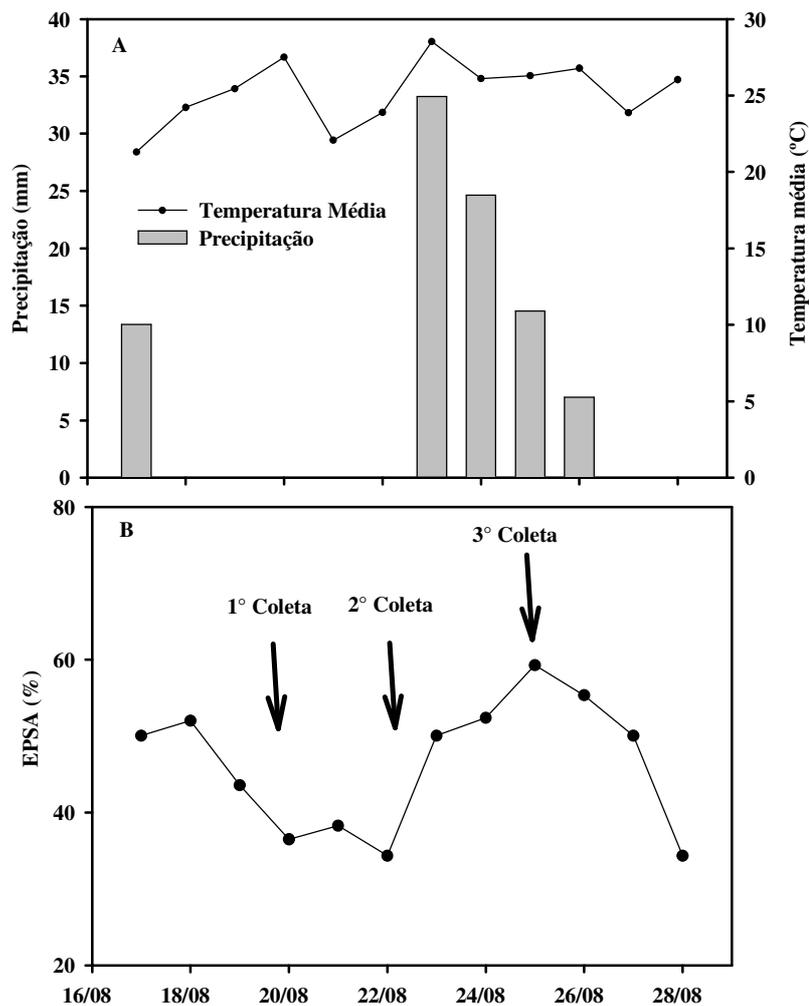


Figura 16. Precipitação diária, temperatura do ar (A) e espaço poroso do solo saturado com água (EPSA) (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de experimentação.

Os resultados apresentados mostram que as perdas de NH_3 derivadas da ureia foram bem superiores às observadas com a aplicação de sulfato de amônio. Isso também pode ser observado com os fatores de volatilização (FV) apresentados na Tabela 5. Os FV para ureia (42 % em média) foram aproximadamente três vezes superiores ao obtido com a aplicação de sulfato de amônio (15 %).

Tabela 5. Fatores de volatilização calculados para cada dose de ureia e de sulfato de amônio aplicada a um Argissolo cultivado com capim-elefante.

Dose/Fonte *	Volatilização de NH ₃	Fator de Volatilização (%) **
N-fertilizante	kg N ha ⁻¹	
50 (U)	18,8 c	38 a
100 (U)	41,7 ab	42 a
150 (U)	67,7 a	45 a
100 (S.A.)	15,1 c	15 b

* kg ha⁻¹ de N na forma de ureia (U) e sulfato de amônio (S.A.)

** (kg N-NH₃ tratamento - kg N-NH₃ controle)/kg N aplicado).

Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.2.4 Produção de biomassa e nitrogênio acumulado

A produção de colmos foi de 14 Mg ha⁻¹ de matéria seca no tratamento controle enquanto que com a utilização da ureia nas doses de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N a produtividade foi de 17, 19 e 20 Mg ha⁻¹ (Figura 17). Com a utilização do sulfato de amônio a produção de colmos foi de 19 Mg ha⁻¹ e não foi detectada diferença significativa entre os tratamentos fertilizados. A mesma tendência foi observada para a produção de folhas, sendo observada produtividade de 9, 11, 10 e 11 Mg ha⁻¹ de matéria seca para os tratamentos controle, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia e sulfato de amônio, respectivamente.

A produção de matéria seca total foi de 22 Mg ha⁻¹ para o tratamento controle, e de 28, 29, 30 Mg ha⁻¹ para as doses de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia respectivamente, e de 31 Mg ha⁻¹ de matéria seca com a dose de 100 kg N ha⁻¹ na forma de sulfato de amônio. Foi observada diferença estatística significativa entre o controle e os demais tratamentos.

A dose de 50 kg ha⁻¹ de N causou maior ganho de biomassa por unidade de N fertilizante aplicada (107 kg MS kg⁻¹ de N aplicado). Houve uma redução de eficiência com o aumento da dose de ureia para 100 e 150 kg ha⁻¹ de N, resultando em ganhos de biomassa de 64 e 52 kg MS kg⁻¹ N aplicado. O ganho de biomassa no tratamento com 100 kg N ha⁻¹ na forma de sulfato de amônio foi de 77 kg MS kg⁻¹ N aplicado, superando o obtido com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

Assim como no experimento I, observou-se um maior acúmulo de N na biomassa com o aumento das doses de ureia (Figura 18). No entanto, os maiores acúmulos de N foram observados quando se aplicou sulfato de amônio.

Subtraindo-se a quantidade de N acumulada nas plantas do tratamento controle (sem N) das quantidades obtidas das plantas nos tratamentos com doses de ureia ou com sulfato de amônio, observou-se que a maior eficiência de uso do N do fertilizante foi obtida com a aplicação de sulfato de amônio (60%). Com a dose de 150 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, a eficiência foi de 36%, comparável às obtidas com as demais doses (39% com 50 kg ha⁻¹ de N como ureia, e 32 % com a dose de 100 kg ha⁻¹ de N).

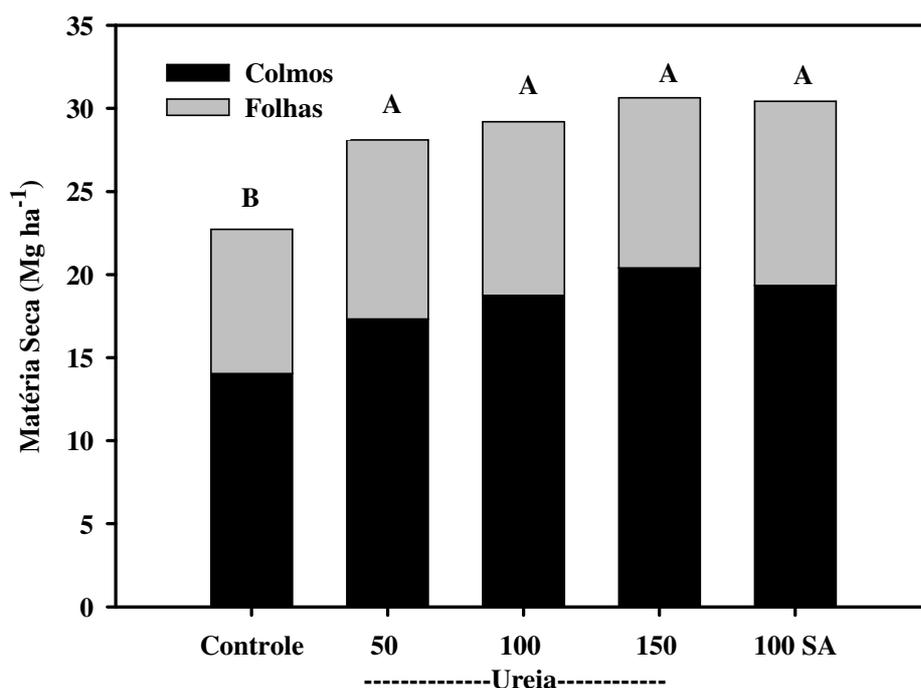


Figura 17. Produção de biomassa (colmos e folhas) do genótipo de capim-elefante Cameron cultivado com doses de N-fertilizante na forma de ureia em comparação com sulfato de amônia. S.A. Sulfato de Amônio (100 kg N ha⁻¹). Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

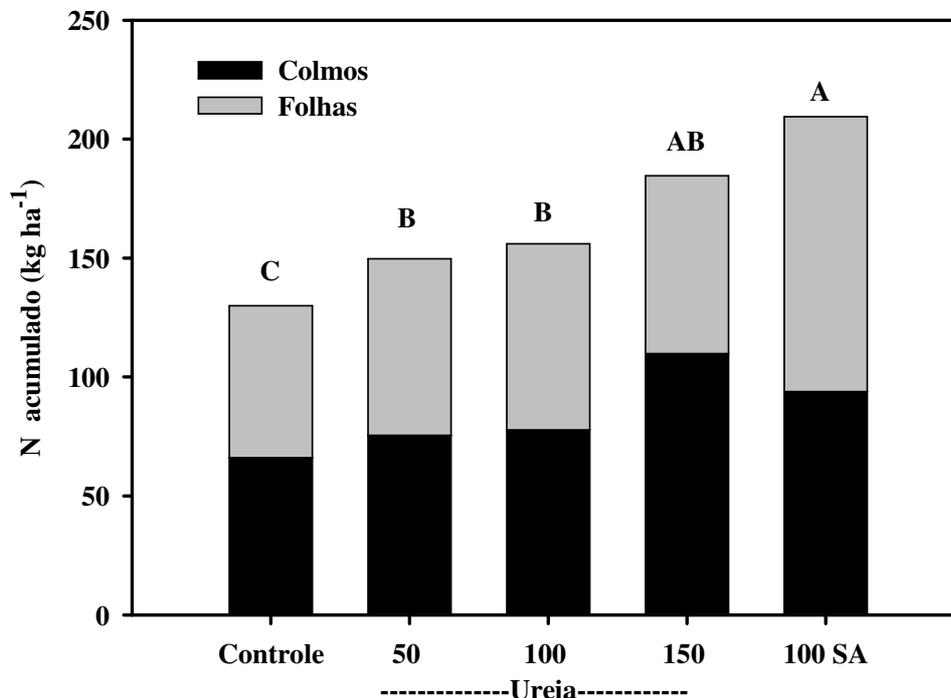


Figura 18. Nitrogênio acumulado nos colmos e folhas do genótipo Cameron cultivado com doses de N-fertilizante na forma de ureia e sulfato de amônia. S.A. Sulfato de Amônio (100 kg N ha⁻¹). Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.2.5 Fixação biológica de nitrogênio

Os procedimentos para cálculos de FBN foram os mesmos adotados para o experimento I. Utilizaram-se como plantas testemunhas neste ciclo as espécies *Richardia brasiliensis* e *Sida carpinifolia* que apresentaram valores de $\delta^{15}N$ de 10,4 e 10,1, respectivamente. O capim-elefante apresentou $\delta^{15}N$ de 7,8 e por isso a FBN média neste ciclo foi de 24%.

4.2.6 Relação carbono/nitrogênio e relação caule/folha

A relação C/N da biomassa de capim elefante reduziu com a dose de N na forma de ureia, porém o efeito foi mais marcante com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de sulfato de amônio (Figura 19). A relação C/F manteve-se constante com o aumento das doses de ureia aplicadas, sendo o maior valor encontrado com a aplicação de 150 kg ha⁻¹ de N.

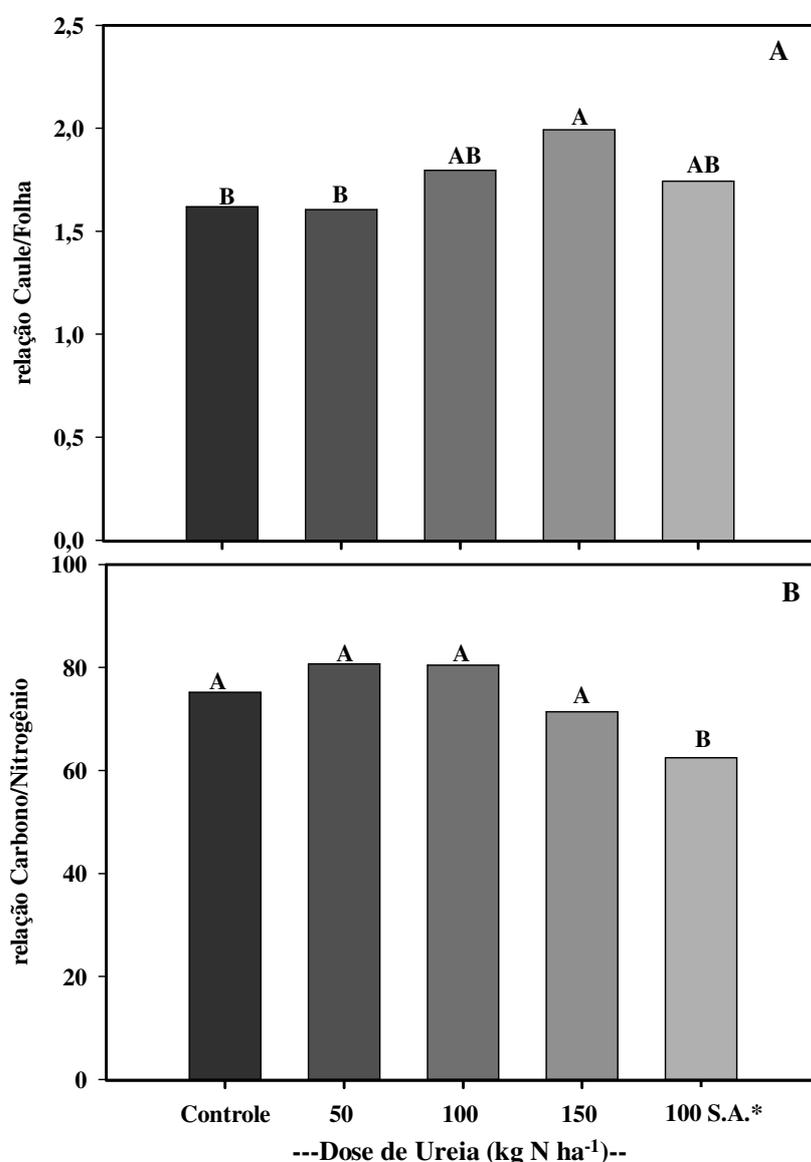


Figura 19. Relação caule/folha (A) e relação carbono/nitrogênio (B) e da biomassa do genótipo Cameron cultivado com doses e fontes de N-fertilizante. S.A. Sulfato de Amônio. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.3 Influência da Forma de Aplicação da Ureia, em Comparação com Sulfato de Amônio, no Balanço de N do Sistema Solo-Planta. Experimento III

4.3.1 Emissão de N₂O, EPSA e variáveis climáticas

Os resultados obtidos na Figura 20 mostram que a adubação nitrogenada novamente teve efeito expressivo sobre as emissões de N₂O, especialmente quando após a ocorrência de chuvas. A aplicação de N aumentou os fluxos de N₂O do solo em no mínimo 20 vezes em relação ao tratamento controle, o qual quase sempre apresentou fluxos inferiores a 17 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹. Um pico de emissão de N₂O ocorreu 5 dias após a fertilização nitrogenada, e foi precedido de uma chuva de 45 mm, que determinou o aumento da EPSA para valores acima de 60% (Figura 20).

As emissões de N₂O nos tratamentos adubados com sulfato de amônio sempre se mantiveram abaixo dos fluxos observados para ureia. O pico máximo de emissão de N₂O, quando se utilizou sulfato de amônio, foi de 120 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹, enquanto que para ureia estes valores superaram 300 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹. Não foi observada diferença significativa nas emissões de N₂O em relação à forma de aplicação da ureia (enterrada ou cobertura).

Neste estudo, o regime de chuvas foi bem distribuído, com maior frequência e maiores lâminas ocorrendo nos meses de fevereiro e março, com eventos superiores a 30 mm diários (Figura 20). A temperatura do ar pode ter sido um fator de pouca influência nos fluxos de N₂O, pois se situou próximo de 28 °C entre janeiro e março, e de 25 °C entre abril e junho. Observou-se uma tendência de diminuição da temperatura do solo ao passar dos meses. No início do experimento a temperatura do solo apresentou-se em média em 27°C para os meses janeiro e fevereiro, enquanto que em maio e junho a temperatura média do solo foi de 23°C.

O espaço poroso saturado por água (EPSA) variou de 15 a 63% durante o estudo. No intervalo de 19 de janeiro a 21 de março, o EPSA permaneceu acima de 55% e entre 14 de abril a 12 de junho, os valores de EPSA estiveram abaixo de 40 % na maioria das coletas realizadas.

Os picos de emissão de N₂O ocorreram quando a disponibilidade de N mineral do solo era maior (Figura 21). Após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados, as concentrações de NH₄⁺ e NO₃⁻ superaram 15 e 20 mg N kg⁻¹ de solo respectivamente (Figura 21), e não foi detectada diferença marcante nas concentrações das duas espécies químicas em função do fertilizante usado ou forma de aplicação. A partir do mês de maio, após 40 dias da aplicação dos fertilizantes, as concentrações de NH₄⁺ e NO₃⁻ foram diminuindo e mantiveram-se abaixo de 15 mg N kg⁻¹ de solo.

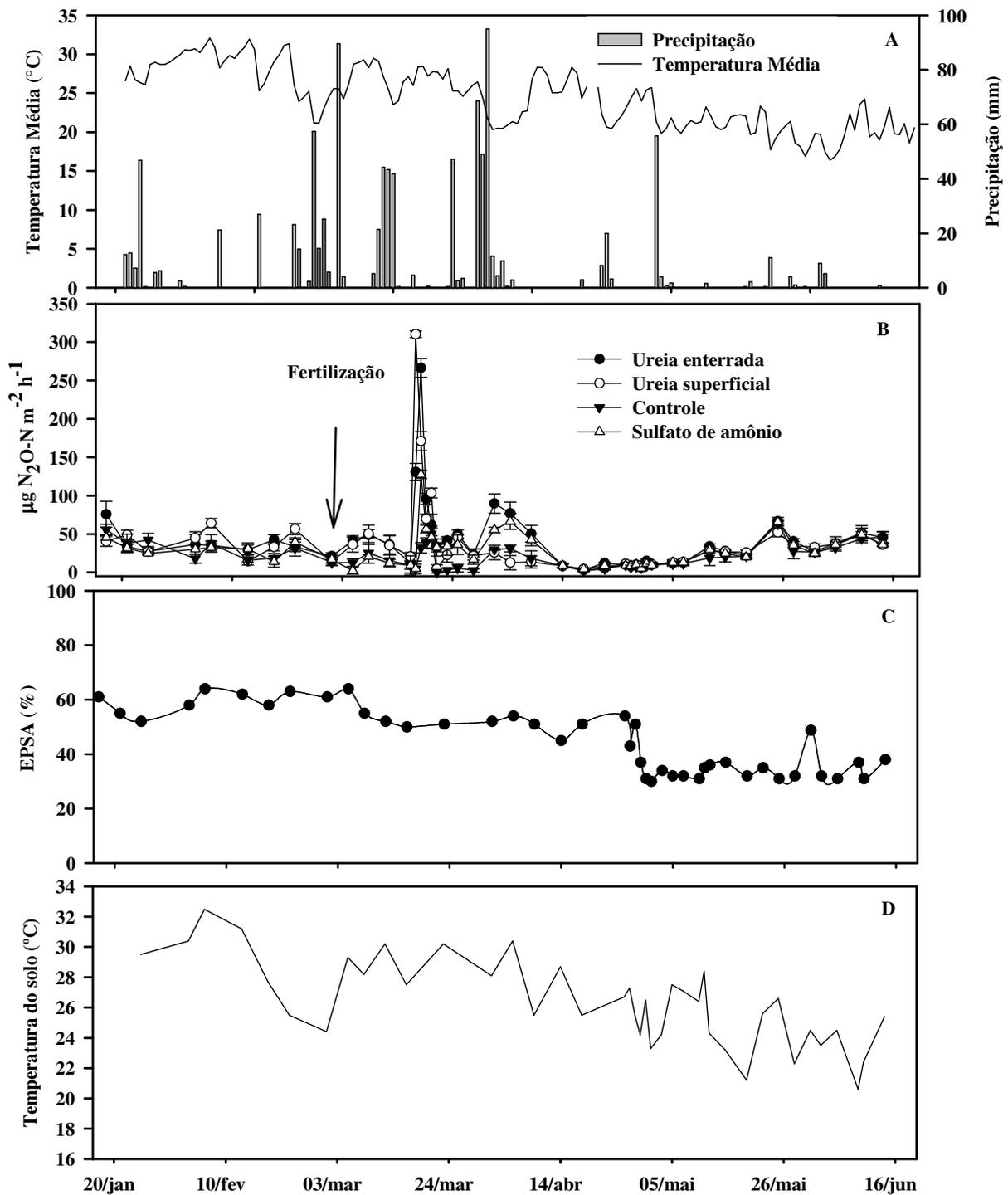


Figura 20. Precipitação mensal e temperatura do ar (A), espaço poroso saturado por água (B), emissões de N_2O (C) e temperatura do solo (D) derivadas da aplicação de ureia enterrada, ureia cobertura e sulfato de amônio em cultivo de capim-elefante. A seta representa a data de aplicação do N-fertilizante.

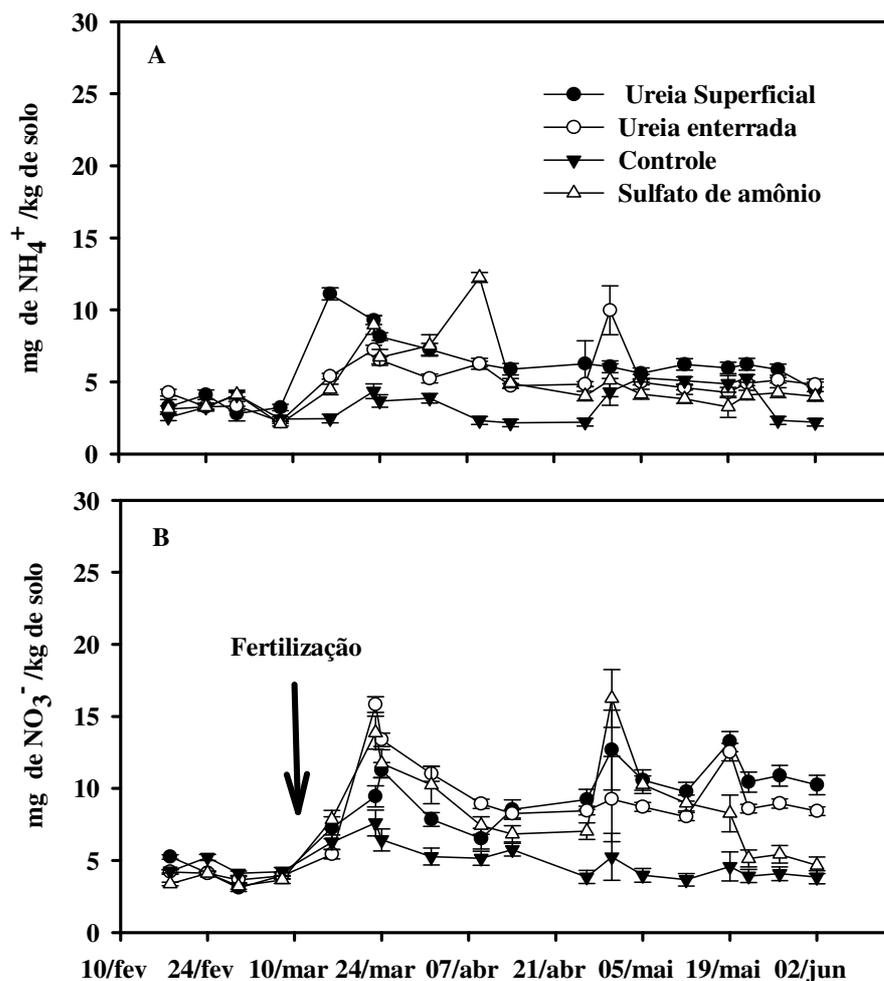


Figura 21. Variação da concentração de nitrato e amônio do solo (0-10 cm) cultivado com capim-elefante sob diferentes formas de fertilização. A seta representa a data de aplicação dos tratamentos.

4.3.2 Fatores de emissão

A emissão acumulada de N_2O do solo fertilizado com sulfato de amônio foi cerca de 55 % menor do que a obtida com a aplicação da ureia enterrada (Tabela 6). O enterro da ureia acarretou em tendência de diminuição das emissões de N_2O (20 %), porém, não diferiu estatisticamente do tratamento em que a ureia foi aplicada superficialmente. Em decorrência das emissões acumuladas, foi possível determinar fatores de emissão direta (FE) de N_2O para as fontes e formas de aplicação do N, sendo de 0,72% e 0,88% quando a ureia foi enterrada e aplicada superficialmente, respectivamente, e para a aplicação com sulfato de amônio, foi 0,31% (Tabela 6). O FE médio, sem considerar a fonte testada, foi de 0,64%.

Tabela 6. Fatores de emissão de N_2O provenientes da aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.

Tratamento (kg ha ⁻¹ de N)	Emissão de N_2O kg ha ⁻¹	Fator de emissão (%) *
Ureia em Superfície	0,704 a	0,88 a
Ureia Enterrada	0,574 a	0,72 a
Sulfato de Amônio	0,250 b	0,31 b

* (kg N_2O tratamento - kg N_2O testemunha)/kg N aplicado)

Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.3.3 Volatilização de amônia derivada das doses de N-fertilizante

As perdas de NH_3 variaram em função da forma de aplicação e da fonte de N (Figura 22). Com a utilização da ureia, as perdas foram de 18 kg de $\text{N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$ quando o adubo foi enterrado, e de 33 kg de $\text{N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$ quando foi aplicada superficialmente próxima à linha de plantio do capim. Com a aplicação de sulfato de amônio, a perda foi significativamente menor, chegando a 16 kg de $\text{N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$. Do total de NH_3 perdido, mais de 75 % ocorreu nos três primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes.

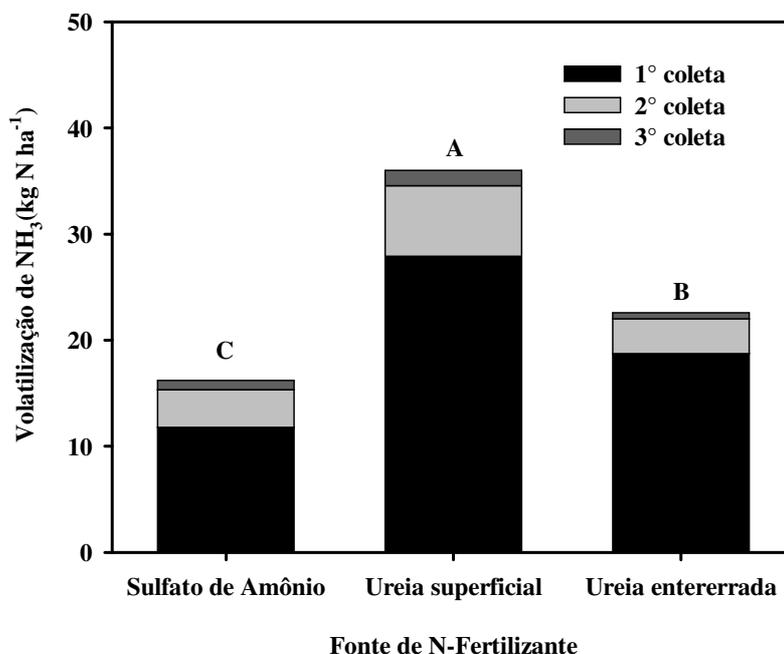


Figura 22. Volatilização de NH_3 (kg ha^{-1} de N) estimada para solo com aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio em superfície para o cultivo do capim-elefante. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

Observaram-se eventos significativos de precipitação após a aplicação do fertilizante, acima de 30 mm por dia. Estes eventos, ocorridos durante 7 dias seguidos, podem ter contribuído para reduzir perdas por volatilização de NH_3 (Figura 23), especialmente quando comparadas com os resultados obtidos no experimento I. A temperatura do ar não oscilou significativamente, e em média manteve-se próximo de 27 °C. Em função dos eventos de precipitação, o EPSA do solo manteve-se acima de 60 % do 3º ao 7º dia após a aplicação do N-fertilizante (Figura 23). Assim como a temperatura do ar, a temperatura do solo não variou muito durante o período das coletas, e esteve próxima de 25°C durante grande parte do período experimental.

O fator de volatilização de NH_3 mais elevado (45 %) foi obtido com a ureia aplicada superficialmente. Ao incorporar a ureia observou-se uma diminuição de 23 % da quantidade de N volatilizado em relação à aplicação superficial (Tabela 7). As perdas com a utilização do sulfato de amônio foram bem menores, em torno de 20 %.

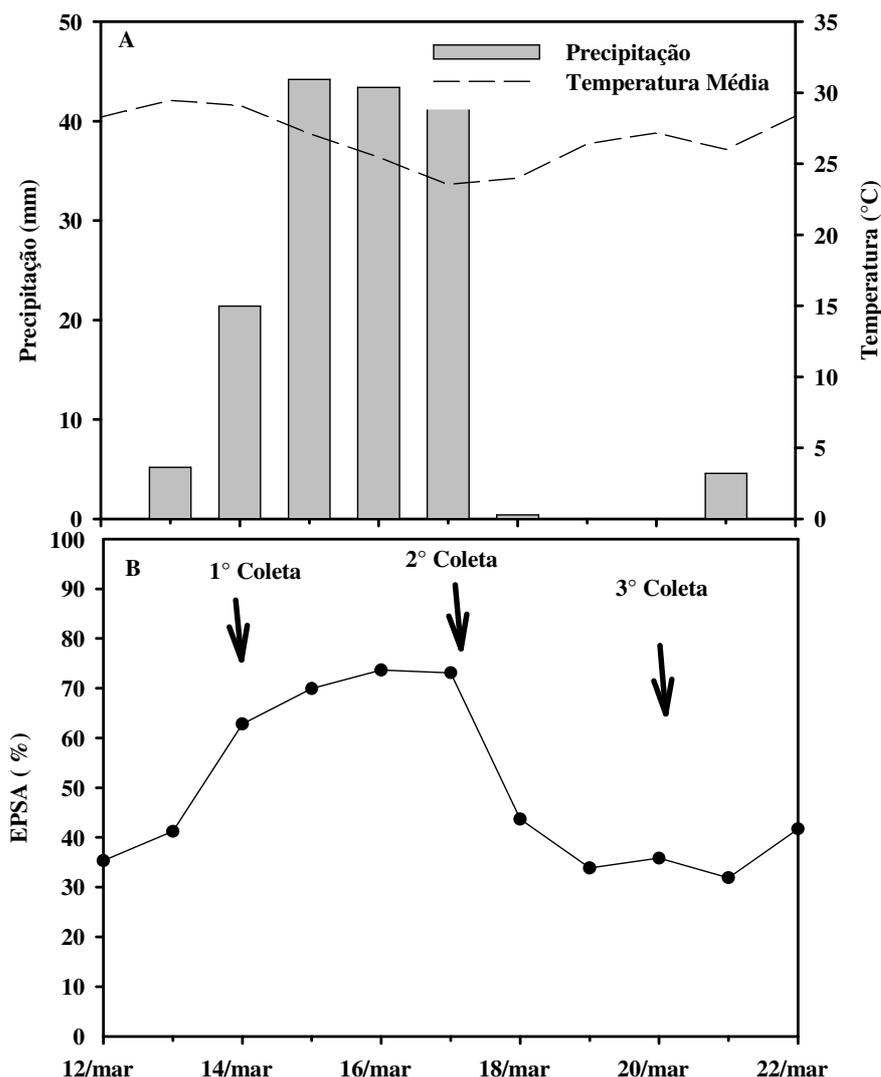


Figura 23. Precipitação diária, temperatura do ar (Fonte: INMET) (A) e EPSA do solo (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de coletas do N volatilizado. As setas representam as datas das três coletas realizadas.

Tabela 7. Fatores de volatilização de NH_3 provenientes da aplicação de N-fertilizante na forma de ureia, em superfície ou enterrada, e sulfato de amônio para o cultivo do capim-elefante.

Dose de N-fertilizante	Volatilização de NH_3	
	(kg N ha ⁻¹)	FV (%)
Ureia Cobertura	36,1 a	45,1 a
Ureia Enterrada	22,5 b	28,2 b
Sulfato de Amônio	16,2 c	20,2 c

Fator de Volatilização (FV) = kg N- NH_3 volatilizado/total kg N aplicado. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.3.4 Produção de biomassa

A produção de matéria seca de capim elefante foi de 26,2 e 25,5 Mg ha⁻¹ respectivamente para os tratamentos com ureia enterrada e com sulfato de amônio, os quais diferiram estatisticamente dos tratamentos ureia aplicada em superfície e controle, com 16 e 18,9 Mg ha⁻¹ de produtividade de matéria seca, respectivamente (Figura 24). A maior produção de biomassa por kg de N aplicado, descontada a produção obtida do tratamento sem N, foi observada no tratamento em que a ureia foi enterrada (88 kg MS capim kg⁻¹ N aplicado), seguido pelo tratamento sulfato de amônio (77 kg MS capim kg⁻¹ N aplicado). Quando a ureia foi aplicada superficialmente, o ganho de produtividade foi aproximadamente 40 % menor, com 53 kg MS capim por kg⁻¹ de N aplicado.

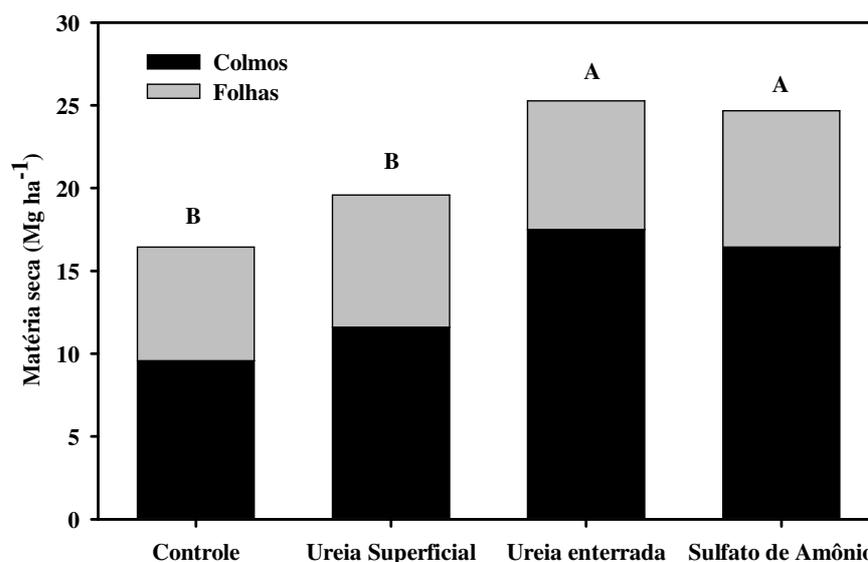


Figura 24. Produtividade de matéria seca de colmos e folhas do capim elefante (Mg ha⁻¹ de matéria seca), genótipo Cameroon, sob duas formas de aplicação de ureia (cobertura e enterrada) e sulfato de amônio aplicado superficialmente. Letras iguais não diferem pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.

As maiores acumulações de N foram obtidas com a aplicação de sulfato de amônio e ureia enterrada, que diferiram estatisticamente do controle (Figura 25). Para esses dois tratamentos, o acúmulo de N foi superior a 170 kg ha⁻¹ de N na biomassa do capim-elefante. Descontando-se o N acumulado no controle da quantidade de N acumulada na biomassa dos demais tratamentos, o N derivado do fertilizante nas plantas foi de 57, 54 e 27 kg ha⁻¹ de N para os tratamentos sulfato de amônio, ureia enterrada e ureia aplicada superficialmente, respectivamente. A maior parte do N nas plantas foi alocada nas folhas, representando mais de 65 % do total do N da planta em todos os tratamentos estudados que receberam fertilizantes.

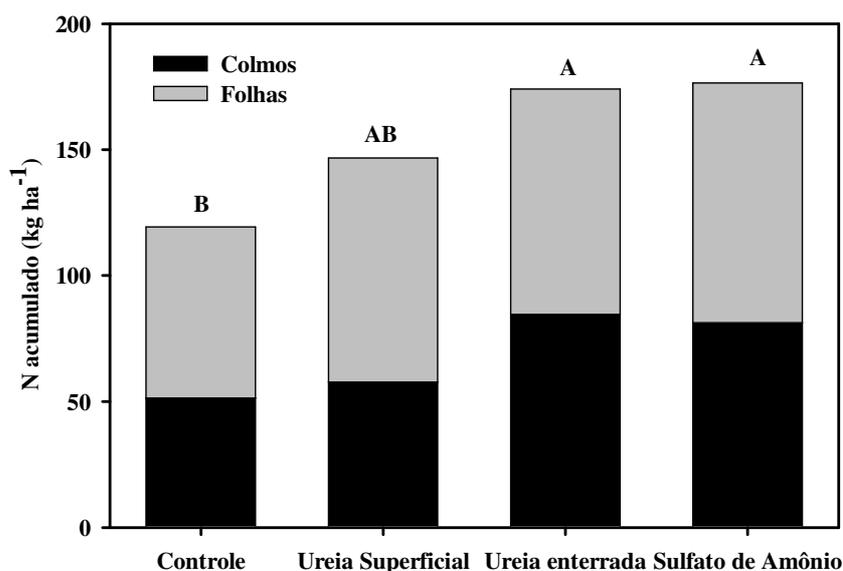


Figura 25. Nitrogênio acumulado em colmos e folhas (kg ha^{-1} de N) do genótipo Cameroon sob duas formas de aplicação de Ureia, em cobertura e enterrada, e sulfato de amônio aplicado em Cobertura. Letras iguais não diferem pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.

4.3.5 Fixação biológica de nitrogênio

Os cálculos de FBN foram os mesmos adotados para o experimento I e II. Utilizaram-se como plantas testemunhas neste ciclo às espécies *Richardia brasiliensis* e *Sida carpinifolia* que apresentaram valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ de 10,5 e 11,2 respectivamente. O capim-elefante apresentou $\delta^{15}\text{N}$ de 8,2 e a contribuição média da FBN média neste ciclo foi de 25%.

4.3.6 Eficiência do uso do nitrogênio derivado do fertilizante

Pela técnica isotópica observou-se que os tratamentos ureia enterrada e sulfato de amônio ocasionaram maiores acúmulos de N na parte aérea das plantas, com um total de 38 kg ha^{-1} de N. Estes tratamentos diferiram estatisticamente da ureia aplicada em superfície onde se observou um acúmulo de N na planta de 17 kg ha^{-1} (Tabela 8).

Considerando-se as quantidades de N perdidas na forma de NH_3 e N_2O e as quantidades utilizadas pela planta, estima-se que $16,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, ou o equivalente a 21% da ureia aplicada superficialmente devem ter sido perdidos por outras vias, ou permanecido no solo imobilizado na matéria orgânica e disponível na solução do solo (Tabela 8).

Tabela 8. Quantidades de N (kg ha^{-1}) provenientes do fertilizante acumuladas na planta e no solo estimadas através da utilização de fertilizante enriquecido com ^{15}N , e as perdas por volatilização de amônia, N_2O e outras vias, para os tratamentos com formas de aplicação de ureia e com sulfato de amônio.

Tratamentos	Total na planta	Total no Solo	Perdas por volatilização	Perdas de N_2O	N-não recuperado
Ureia Enterrada	38,4 a	13,1 a	22,4 b	0,58 a	6,1 b
Ureia Cobertura	17,1 b	10,4 a	36 a	0,70 a	16,5 a
Sulfato de Amônio	37,5 a	11,1 a	16 c	0,25 b	15,4 a
Média	31,0	11,5	24,8	0,5	12,7
CV (%)	22	18,5	16	23	24,2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

A maior fração do N-fertilizante recuperada pela planta (soma de colmos, folhas e raízes) foi de 48 % com a utilização da ureia enterrada, enquanto que com sulfato de amônio, foi de 42% (Tabela 9). Não foi observada diferença estatística significativa entre os tratamentos anteriormente citados, porém, quando comparados com a aplicação da ureia em cobertura (21 %), observou-se diferença estatística significativa. Menos do que 17 % do N-fertilizante aplicado permaneceu no solo após o cultivo do capim-elefante em todos os tratamentos com fertilizante.

Utilizando-se o balanço de ^{15}N associado aos dados de perdas por volatilização de amônia e emissão de N_2O , confirma-se que o uso da ureia enterrada preserva mais o N no sistema, porém não diferindo da aplicação do sulfato de amônio.

Tabela 9. Percentagem de N provenientes do fertilizante acumuladas na planta e no solo estimadas através da utilização de fertilizante enriquecido com ^{15}N , e as perdas por volatilização de amônia, N_2O e outras vias, para os tratamentos com formas de aplicação de ureia e com sulfato de amônio.

Tratamentos	Total na planta	Total no Solo	Perdas por volatilização	Perdas de N_2O	N-não recuperado
			%		
Ureia Enterrada	47,9 a	16,3 a	28 ab	0,72 a	7,7 b
Ureia Cobertura	21,4 b	13,0 a	45 a	0,88 a	20,6 a
Sulfato de Amônio	46,9 a	13,9 a	20 b	0,31 b	19,3 a
Média	38,7	14,4	31,0	0,6	15,8
CV (%)	22,1	26,3	24,5	25,1	22

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

4.4 Influência da Adubação Verde e da Ureia Revestida com Polímero nas Emissões de N_2O do Solo e na Produção de Biomassa do Capim-elefante. Experimento IV

4.4.1 Emissão de N_2O , EPSA e variáveis climáticas

Os fluxos de N_2O monitorados durante o período de 20 de dezembro até 20 de março, que compreendeu as fases de preparo do solo e plantio do feijão de porco e sorgo até o corte dessas espécies, foram elevados, especialmente no período após o preparo do solo (Figura 26). No período entre 20 de janeiro a 25 de fevereiro, os fluxos de N_2O observados nas áreas onde crescia o feijão de porco foram maiores do que quando comparados através das barras de erro padrão da média com os das áreas onde cresciam o sorgo ou que estavam em pousio.

No período entre 20 de março e 20 de maio, os maiores fluxos de N_2O foram observados nas áreas onde se incorporou a biomassa do feijão de porco. Nessas parcelas, foram observados fluxos superiores a $800 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Na área que foi incorporada a biomassa do sorgo, estes fluxos não superaram $400 \mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 26). Após o plantio do capim elefante, os fluxos de N_2O mantiveram-se abaixo de $30 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em todos os tratamentos. Em todas as etapas, os maiores fluxos ocorreram após períodos de chuvas mais intensas, que elevaram o EPSA acima de 60%. No período entre 26 de janeiro a 23 de fevereiro foi observado um período de estiagem, e por isso foram realizadas irrigações na área com lâminas de aproximadamente 30 mm, a cada 5 dias. Neste período, o EPSA manteve-se próximo de 40%. A variação de temperatura do ar neste período não foi significativa com valor médio de 25°C . A temperatura do solo também não variou bastante e apresentou valor médio de $27,5^\circ\text{C}$.

As emissões de N_2O acumuladas no período entre o plantio da leguminosa até a fase de utilização dos fertilizantes, descontando-se as emissões acumuladas nas parcelas controle,

foram de 3,77 e 0,25 kg N-N₂O ha⁻¹ para as áreas cultivadas com feijão de porco e sorgo respectivamente.

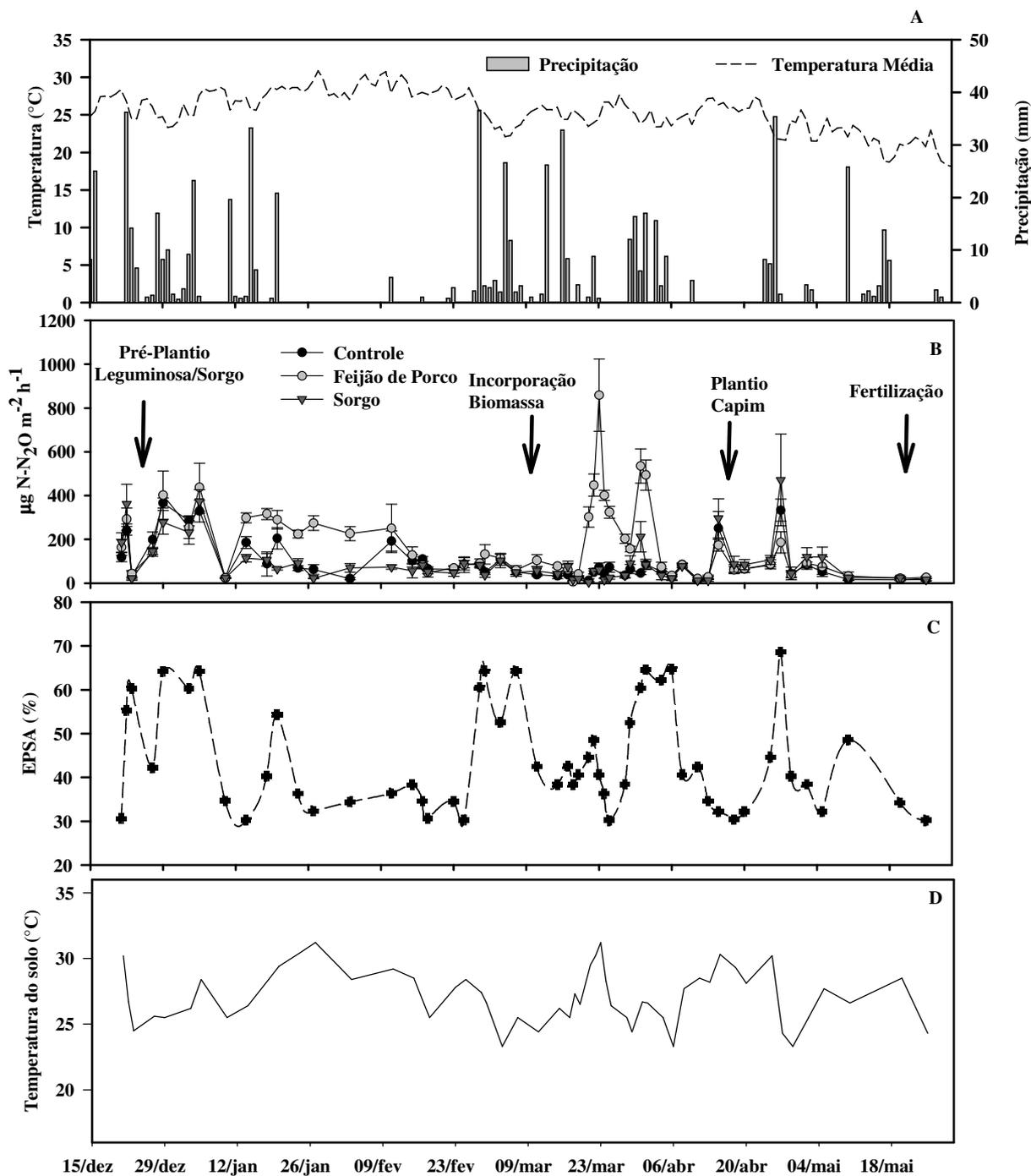


Figura 26. Precipitação mensal e temperatura do ar (A), espaço poroso saturado por água (B), emissões de N₂O (C) e temperatura do solo (D) derivadas do cultivo e da incorporação da biomassa de feijão de porco e sorgo em pré-plantio de capim-elefante. As setas representam as datas dos eventos realizados.

4.4.2 Teores de NO₃⁻ e NH₄⁺ do solo nas etapas experimentais

Os teores de N mineral, especialmente NO₃⁻, aumentaram em decorrência da etapa de gradagem da área para o preparo do solo para plantio. No entanto, um mês após o plantio dos adubos verdes, observaram-se maiores teores de NH₄⁺ e NO₃⁻ no solo nas parcelas cultivadas

com feijão de porco (Figura 27). Os teores de NO_3^- e NH_4^+ do solo neste período variaram de 10 a 15 mg N kg solo⁻¹, quando também foram observados maiores fluxos de N_2O na área onde foram cultivados o feijão de porco. No início do mês de março, observou-se que os teores de N mineral das parcelas cultivadas com feijão de porco foram próximos dos das parcelas cultivadas com sorgo e das que ficaram em pousio. Após a incorporação ao solo da biomassa existente nas parcelas com adubos verdes ou ervas espontâneas, os teores de NO_3^- e NH_4^+ também foram maiores nas parcelas onde foram incorporados os resíduos de feijão de porco. Após 40 dias da incorporação da biomassa, os maiores teores de N mineral foram observados nas parcelas de sorgo, o que pode estar associado a uma mineralização de N dos resíduos mais tardia, em função da relação C/N da biomassa do sorgo ter sido próxima de 60. Por outro lado, a relação C/N da biomassa das plantas de feijão de porco foi próxima de 12.

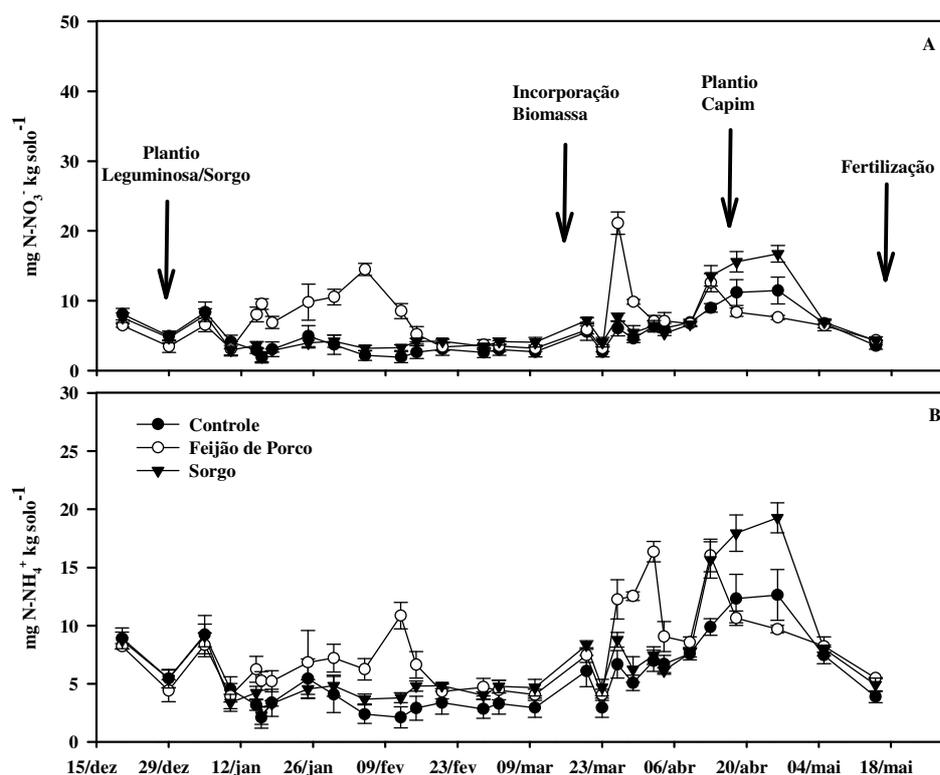


Figura 27. Teores de NO_3^- (A) e de NH_4^+ (B) do solo durante o cultivo dos adubos verdes e após sua incorporação ao solo. As setas representam as datas dos eventos realizados.

4.4.3 Quantificação da FBN para o feijão de porco

Os resultados de $\delta^{15}\text{N}$ na parte aérea do sorgo, usado como referência da abundância natural de ^{15}N do N disponível do solo, mostraram enriquecimento de ^{15}N de 2 a 6 $\delta^{15}\text{N}$ desde plantas recém germinadas até 82 dias após o plantio, respectivamente. Ao contrário desse padrão, os resultados da análise de $\delta^{15}\text{N}$ da parte aérea do feijão de porco decresceram 4 $\delta^{15}\text{N}$ durante o período de crescimento das plantas (Figura 28A). No período entre 30 e 60 DAP, quando as emissões de N_2O e os teores de N mineral foram superiores nas parcelas com feijão de porco, observou-se que a FBN estava representando uma parte significativa do N absorvido pelas plantas, com uma contribuição de 75 % e equivalente a 130 kg ha⁻¹ de N (Figura 28B).

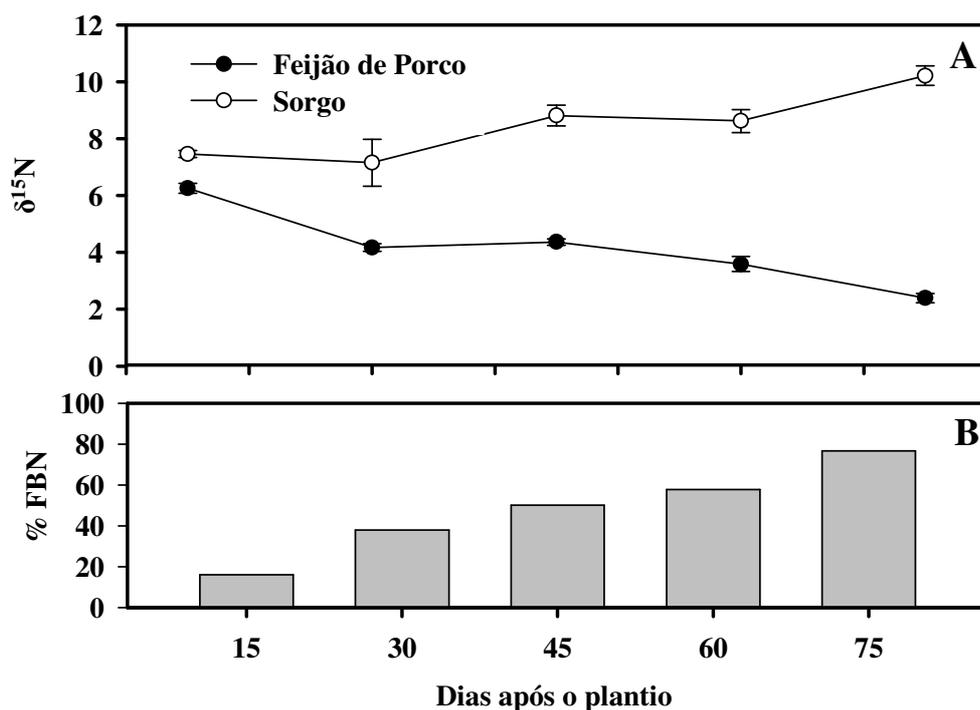


Figura 28. $\delta^{15}\text{N}$ na parte aérea de sorgo e de feijão de porco (A) em diferentes épocas de desenvolvimento das plantas, e contribuição da FBN (%) em feijão de porca (B) estimada utilizando-se as plantas de sorgo como testemunha.

4.4.4 Produção de biomassa e N acumulado das espécies adubos verdes

A produção de biomassa aos 75 dias após o plantio (DAP) foi de 6 Mg ha⁻¹ de matéria seca para o sorgo e para o feijão de porco (Figura 29A). Porém, a quantidade de N acumulada pelo feijão de porco aos 75 DAP foi de 175 kg ha⁻¹ de N, enquanto que para o sorgo foi de 85 kg N ha⁻¹ (Figura 29B). Com os dados de FBN ao longo do crescimento da cultura (Figura 28B), observou-se que o N acumulado derivado da FBN em feijão de porco foi de 2, 9, 34, 82 e 134 kg ha⁻¹ de N, nas coletas de 15, 30, 45, 60 e 75 DAP respectivamente.

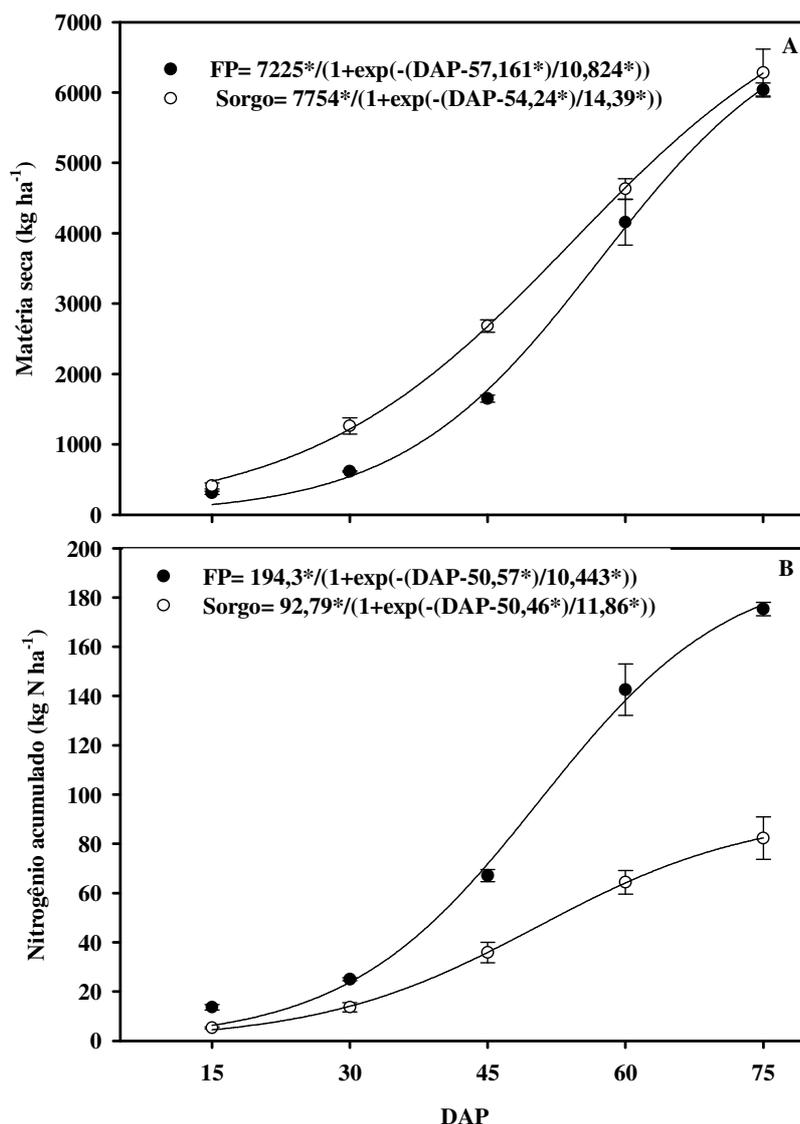


Figura 29. Produção de biomassa (A) e quantidade de N acumulado (B) em função do dia após o plantio (DAP) em feijão de porco e sorgo cultivados em pré-plantio do capim-elefante.

4.4.5 Volatilização de NH₃ derivada da ureia

As perdas por volatilização de NH₃ variaram em função do tipo de fertilizante empregado e da forma de aplicação da ureia (Figura 30). A ureia fornecida pela empresa Kimberlit® (revestida com polímeros), proporcionou um retardamento das perdas por volatilização de NH₃. Na primeira e segunda coleta, 4 e 8 dias após a fertilização (DAF), a maior recuperação do N volatilizado foi observada onde aplicou-se ureia comum (18 e 12 kg N-NH₃ ha⁻¹). Para a ureia fornecida pela empresa Kimberlit®, as maiores perdas de N-NH₃ foram observadas na terceira e quarta coleta (13 e 18 DAF), com aproximadamente 16 e 9 kg N-NH₃ ha⁻¹ volatilizado, respectivamente. A percentagem perdida por volatilização de NH₃ foi de 27% para a ureia revestida da Kimberlit®, enquanto para a ureia comum, foi de 33%. Quando foi aplicada a ureia comum, as perdas por volatilização foram registradas nas duas primeiras coletas, enquanto para a ureia Kimberlit® resultou em perdas somente na 3^o e 4^o coleta. Embora tenha sido observada uma diminuição de perdas em 6% com a utilização da

ureia revestida com polímero, não houve significância estatística pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.

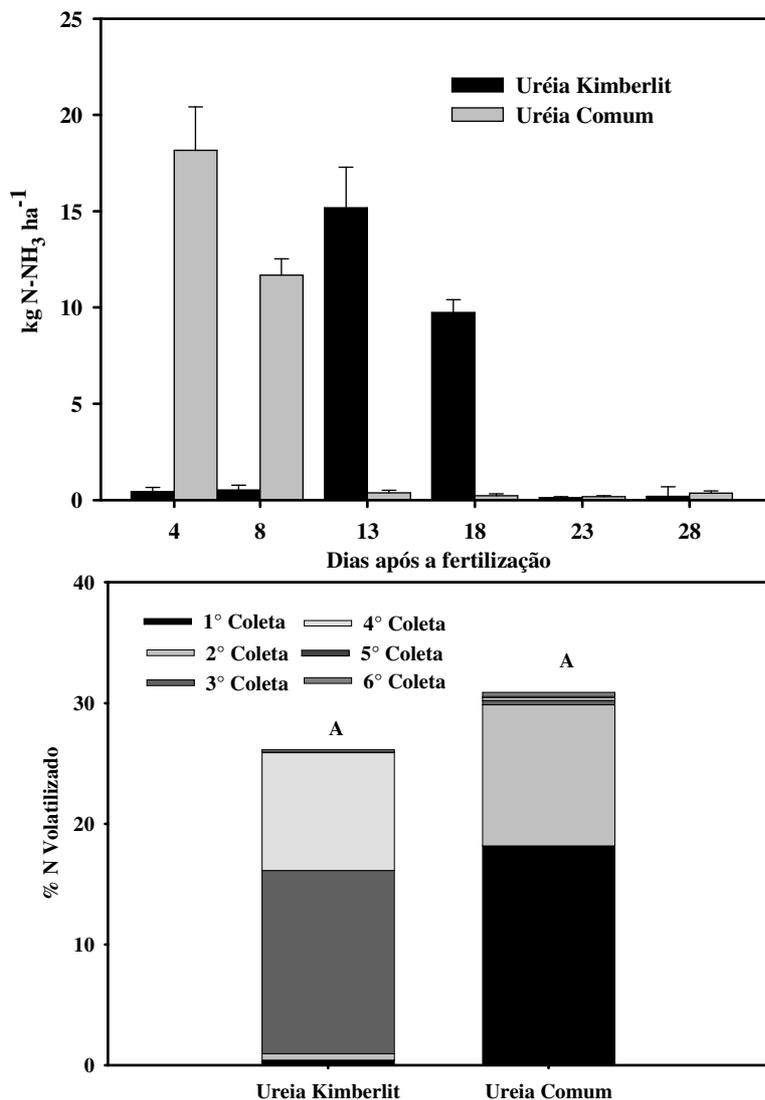


Figura 30. Volatilização de NH₃ em kg N ha⁻¹ (A) e % volatilizada da ureia comum e da ureia revestida Kimberlit® (B) após aplicação em um Argissolo cultivado com capim-elefante. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

A temperatura do ar variou entre 20 e 25 ° C durante o período das avaliações de volatilização de NH₃ (Figura 31). Chuvas de 8 e 10 mm foram registradas nos dois dias seguintes a aplicação dos fertilizantes. Esses dias de chuva, foram seguidos de um período de estiagem de 5 dias, e em seguida 4 dias de chuvas. O total de chuvas acumulado no período foi de 85 mm. A variação do EPSA do solo acompanhou as ocorrências de precipitação.

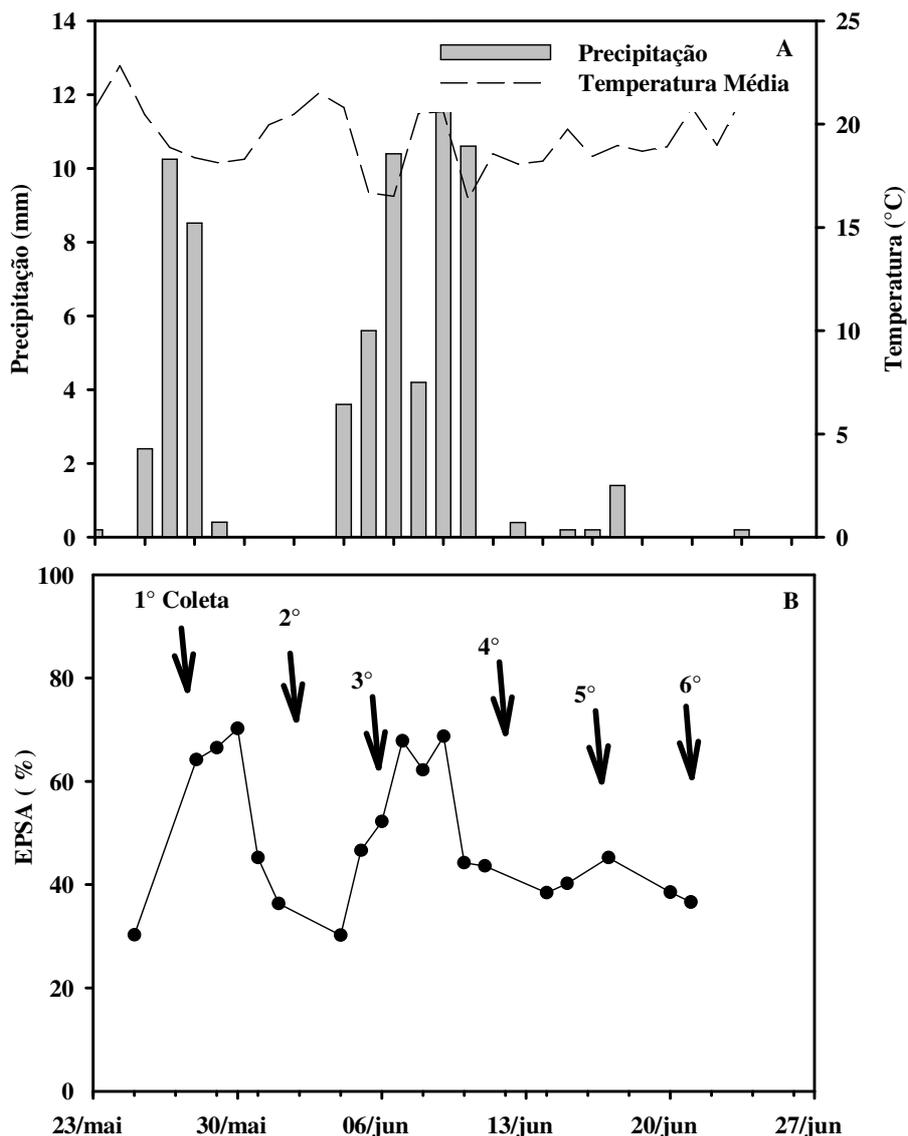


Figura 31. Precipitação diária, temperatura do ar (Fonte: INMET) (A) e EPSA (B) na área de experimentação localizada na cidade de Seropédica – RJ durante o período de amostragens de volatilização de amônia. As setas representam as datas das seis coletas realizadas.

4.4.6 Produção de biomassa e nitrogênio total acumulado pelo capim-elefante

Foi observada diferença estatística significativa entre os tratamentos estudados para a produção de biomassa do capim. As parcelas que não receberam adubação, do tratamento controle, apresentaram os menores valores de matéria seca (17 Mg ha^{-1}), diferindo dos demais. Entre os tratamentos adubados, não houve diferença significativa (Figura 32).

A maior produtividade de biomassa do capim-elefante foi obtida quando foi realizada a adubação verde com *Canavalia ensiformis* em pré-plantio do capim com 25 Mg ha^{-1} de matéria seca. Este tratamento não diferiu estatisticamente dos tratamentos fertilizados com ureia comum e revestida com polímero, onde foram observadas produtividades de 23 e 22 Mg ha^{-1} de matéria seca, respectivamente.

Porém, ressalta-se que a resposta foi diferenciada quando são consideradas as quantidades de N adicionadas. A adubação verde em pré-plantio representou uma quantidade de 170 kg ha^{-1} de N adicionada ao solo. Houve baixa resposta de produtividade do capim

neste tratamento, com uma eficiência de 39,5 kg MS de capim kg⁻¹ N fertilizante aplicado. Por outro lado, com a utilização dos fertilizantes, ureia comum e ureia Kimberlit®, estes ganhos de biomassa foram bem superiores, com valores de 60 e 76 kg MS de capim kg⁻¹ de N aplicado, respectivamente.

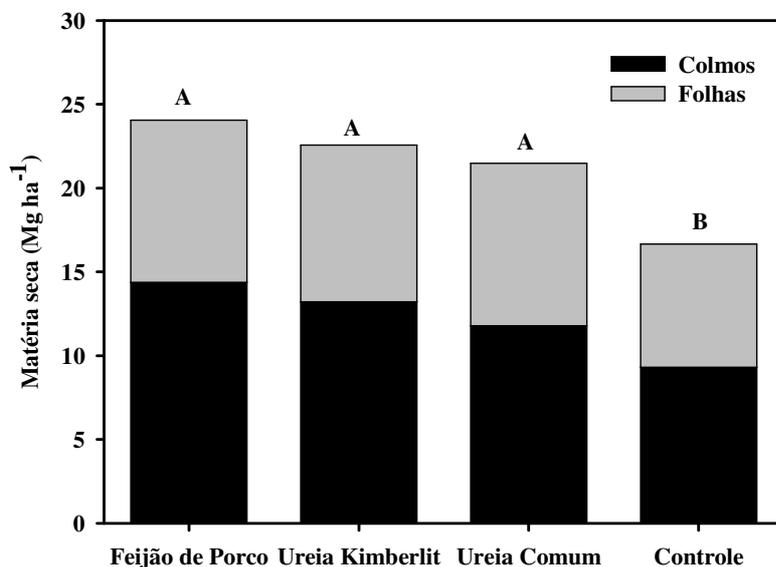


Figura 32. Produção de biomassa do capim-elefante cultivado após adubação verde, ou fertilizado com ureia revestida Kimberlit® ou com ureia comum. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.

O N acumulado na biomassa do capim-elefante também variou entre as fontes testadas e as parcelas sem tratamento com N diferiram estatisticamente das demais (Figura 33). Entre os tratamentos adubados com N, não foram observadas diferenças significativas, com maiores valores nas plantas de capim-elefante cultivadas com adubação verde em pré-plantio com um acúmulo equivalente a 178 kg ha⁻¹ de N na biomassa, seguido pelo tratamento ureia Kimberlit® e ureia comum, respectivamente com acúmulos de 165 e 160 kg ha⁻¹ de N.

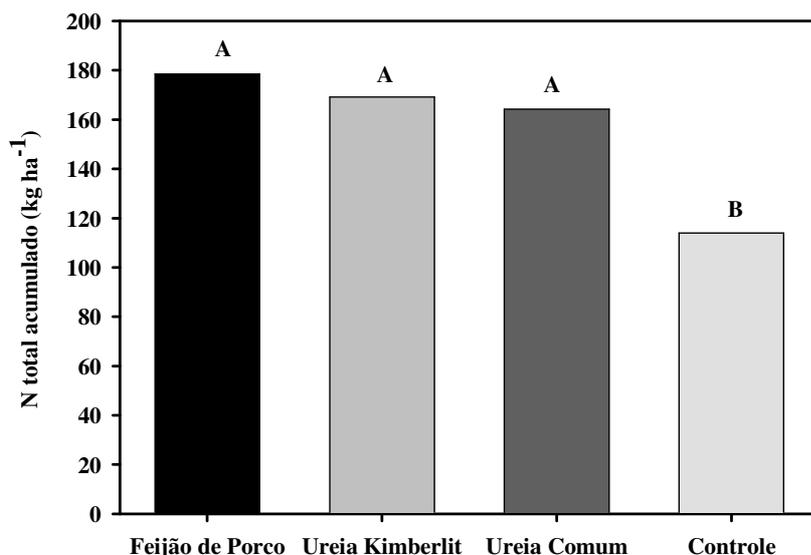


Figura 33. Nitrogênio acumulado na biomassa do capim-elefante cultivado após adubação verde com feijão de porco, ou tratado com ureia comum ou com ureia revestida Kimberlit®, e no tratamento controle sem adição de N. Média com letras iguais não diferem entre si pelo teste de LSD a 5 % de probabilidade.

Descontando-se das quantidades de N acumuladas nas plantas tratadas com fertilizante nitrogenado ou com adubação verde, a quantidade de N acumulado na biomassa do capim-elefante das parcelas controle, estimou-se a eficiência do uso do N por diferença de N-total. As plantas de capim-elefante plantadas após feijão de porco apresentaram uma eficiência de utilização do N de aproximadamente 25 %, enquanto eficiências de 45 e 55% foram encontradas com a utilização dos fertilizantes, ureia comum e Kimberlit®, respectivamente.

4.4.7 Fixação biológica de nitrogênio

Os procedimentos para cálculos de FBN foram os mesmos adotados para o experimento I. Porém, neste ciclo a FBN foi mensurada nas parcelas controle e naquelas em que foi cultivado o feijão de porco em pré-plantio. Utilizaram-se como plantas testemunhas neste ciclo as espécies *Emilia sonchifolia* e *Arnica montana* que apresentaram valores de $\delta^{15}\text{N}$ de 13 e 14 respectivamente nas parcelas controle e 11,3 e 12,9 nas parcelas com resíduos de feijão de porco. O capim-elefante apresentou $\delta^{15}\text{N}$ de 9,5 e 7,1 nos tratamentos controle e no crescido após adubação verde. A contribuição média da FBN média neste ciclo foi de 30 % e 40% nestes dois tratamentos respectivamente.

5. DISCUSSÃO

5.1 Emissões de CO₂

Neste estudo, o preparo do solo incrementou os fluxos de CO₂ em 150% em comparação a área que foi submetida ao preparo do solo, confirmando que as intensas atividades de revolvimento do solo com o uso de arados e grades ocasiona o rompimento dos agregados, permitindo que parte do C protegido no seu interior fique suscetível à mineralização pelos microrganismos do solo (BRONICK e LAL, 2005). Além disso, resíduos e plantas existentes na área são incorporados ao solo, aumentando o conteúdo de material fresco para decomposição, aumentando as emissões de CO₂ (LA SCALLA et al., 2001).

Nos trabalhos de Bayer et al. (2000) e Pes (2009) foram observados maiores fluxos de CO₂ após a utilização de implementos semelhantes ao deste estudo para o preparo do solo. Esses autores afirmam que a utilização de grades e arados está relacionada a uma desagregação e aumento da mineralização da matéria orgânica do solo, estimulando as emissões de CO₂ do solo. Além disso, Liu et al. (2006) sugerem que os efeitos do preparo do solo nas emissões de CO₂ são dependentes da temperatura e a umidade do solo, assim como o tipo de solo em estudo.

La Scala et al. (2006) encontraram fluxos de CO₂ mais altos em solo com preparo convencional em comparação ao mesmo solo em plantio direto durante quase todo o período de monitoramento, destacando o aumento da temperatura do solo como fator que contribuiu diretamente para o resultado. Outro ponto que deve ser considerado é a biomassa existente no momento da aração do solo, pois a incorporação da vegetação promove uma emissão de CO₂ pela decomposição desse material, confundindo os efeitos de aumento de emissão de CO₂ pela desagregação do solo e mineralização da matéria orgânica protegida pela fração mineral. Neste estudo, não foi observada qualquer relação significativa entre as emissões de CO₂ e o aumento da umidade e da temperatura do solo (Figura 34 e 35).

Na literatura há divergências quanto à magnitude dos efeitos destas variáveis sobre as emissões de CO₂. Chavez (2007) encontrou alta correlação ($r=0,89$) entre os fluxos de CO₂ e a temperatura do solo em área manejada com plantio direto, porém, não encontrou correlação significativa entre os fluxos de CO₂ e %EPSA, ou correlação com a temperatura e EPSA (%) em áreas de preparo convencional.

Segundo Linn e Doran (1984), a maior atividade microbiana aeróbica encontra-se com EPSA próxima a 60 % e a menor próxima a 30 %. Segundo os autores, conteúdos de umidade adequados podem permitir aos microrganismos do solo decompor substratos orgânicos a uma taxa mais elevada, fazendo com que o ecossistema perca mais carbono. Nunes (2003) e Dias (2006) encontraram uma relação linear entre o efluxo de CO₂ e a umidade do solo, contrastando com Borges et al. (2006) que reportaram que esta variável não foi um bom indicador dos fluxos de CO₂ do solo.

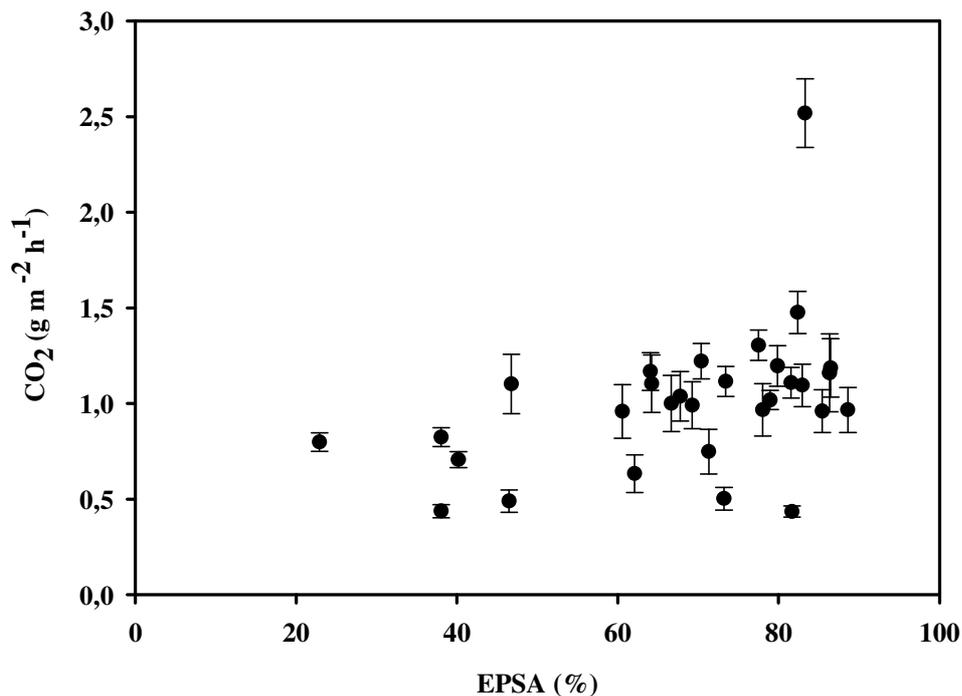


Figura 34. Relação entre percentual de espaço poroso do solo ocupado com água (EPSA%), e os fluxos das emissões CO₂ observados durante o preparo de um Argissolo.

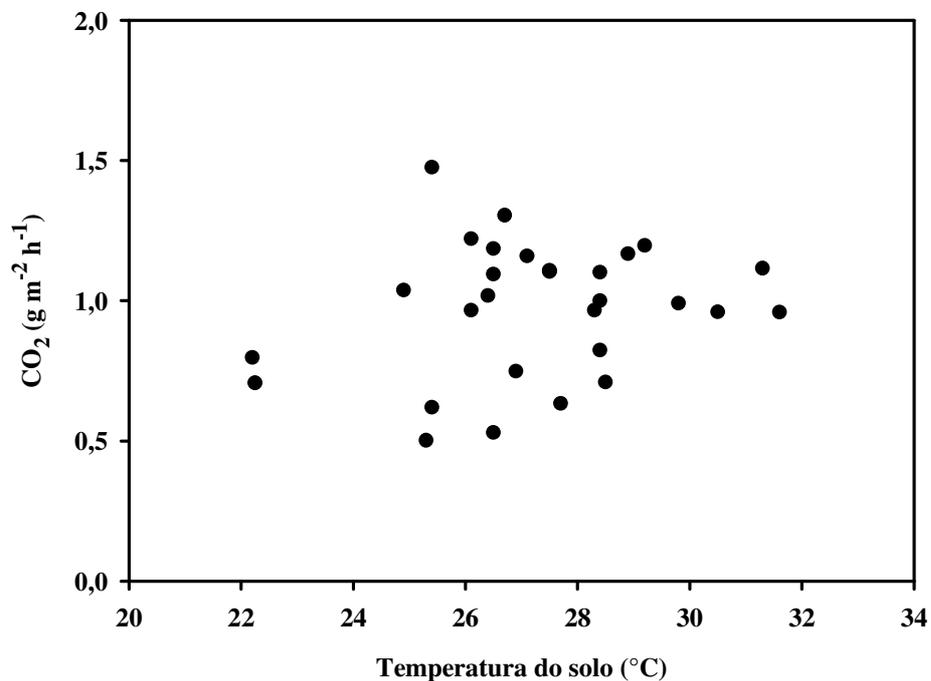


Figura 35. Relação entre os fluxos de CO₂ e a temperatura do solo durante o preparo convencional do solo.

Observou-se tendência exponencial significativa de aumento dos fluxos de CO₂ do solo com aumento dos teores de nitrogênio mineral do solo (Figura 36). Rangel e Silva (2007) e Escobar (2008) observaram maiores fluxos de CO₂ associado a maiores teores de N mineral no solo. De acordo com os autores, isso pode estar relacionado ou com o aumento da atividade dos microrganismos no solo, que decompõem a matéria orgânica liberada dos

agregados, emitindo CO₂ para a atmosfera e liberando N mineral para o solo, ou com a maior oferta de N para que haja aumento na decomposição da matéria orgânica do solo.

Foi observada uma tendência de maiores fluxos de CO₂ ocorrerem com maior intensidade nos tratamentos em que foram aplicadas as maiores doses de ureia, principalmente nos primeiros 30 dias após a aplicação do fertilizante. É provável que a maior disponibilidade de N tenha estimulado a absorção de N pelas plantas após período de limitação e, como consequência, houve incremento da atividade respiratória das raízes e da biota do solo. Carvalho (2005) destaca alta correlação entre a disponibilidade de nitrogênio e os fluxos de CO₂ em solos cultivados com milho.

Considerando todas as variáveis envolvidas no processo, observou-se que, somente a correlação de Pearson entre CO₂ e N mineral foi significativa a 5 % de probabilidade (Tabela 10). As demais correlações (CO₂ x EPSA e CO₂ x Temperatura do solo) não foram significativas.

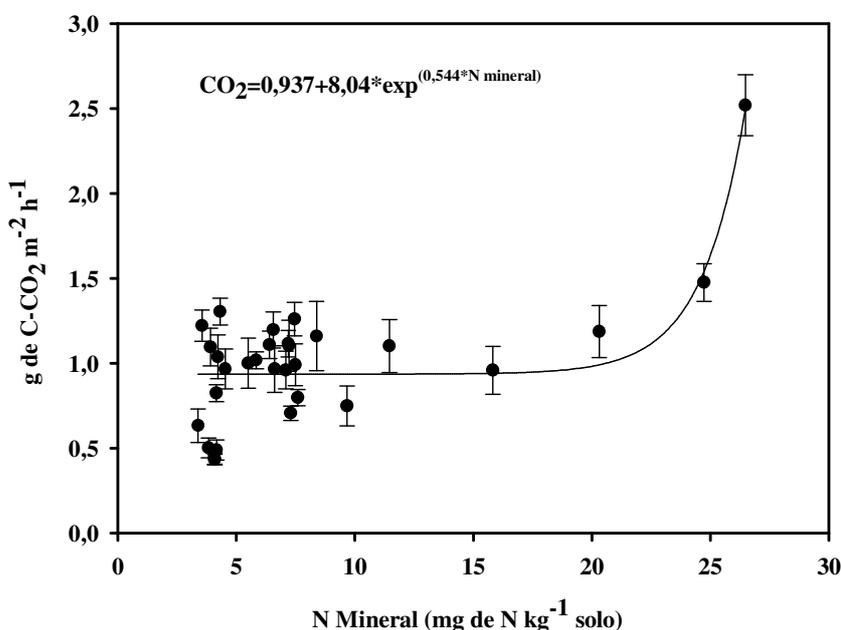


Figura 36. Relação entre os fluxos de CO₂ e nitrogênio mineral das amostras de solo (NO₃⁻ + NH₄⁺) coletadas durante o preparo convencional de um Argissolo localizado no município de Seropédica-RJ.

Tabela 10. Coeficientes de correlação de Pearson entre os fluxos de CO₂, espaço poroso saturado com água (EPSA), temperatura do solo (TSolo) e N mineral (NO₃⁻ + NH₄⁺) obtidos durante o preparo convencional de um Argissolo, em Seropédica-RJ.

Variáveis	CO ₂	EPSA	Temp Solo	N Mineral total
CO ₂	1			
EPSA	0,58	1		
TSolo	0,31	0,55	1	
N Mineral	0,70*	0,45	0,33	1

* Correlação significativa ao nível de significância de 5 %.

5.2 Emissões de CH₄

Na maioria do período de monitoramento de gases dos experimentos I e II, ocorreram emissões de CH₄ com fluxos abaixo de 20 µg CH₄ m⁻² h⁻¹, exceto na fase de preparo do solo do Experimento I, quando foram observados fluxos bem mais altos. As chuvas intensas e freqüentes elevaram a %EPSA acima de 80 % por quase uma semana, acarretando em emissão significativa de CH₄.

A produção deste gás, em solos agrícolas, se dá especialmente em um ambiente anaeróbio (MOSIER et al., 2004), devido aos microrganismos terem o CH₄ como produto final do metabolismo oxidativo do substrato orgânico (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). A emissão de CH₄ também é condicionada pela textura do solo, sendo que os solos de textura mais arenosa apresentam maior oxidação do CH₄ do que os solos argilosos (BOECKX et al., 1997). Em solos aeróbios, também pode ocorrer oxidação do CH₄, processos também chamados de absorção, sendo o solo um dreno (WANG e INESON, 2003), ou produção de CH₄ (metanogênese), associada a produção de metano em sítios anaeróbicos.

No presente estudo, a fertilização nitrogenada não apresentou influência sobre os fluxos deste gás no solo, pois não houve diferença entre o tratamento controle e os tratamentos fertilizados. Em solos agrícolas, a aplicação de adubos nitrogenados diminui a taxa de absorção de CH₄ (MAJUMDAR e MITRA, 2004). O amônio atua como inibidor da absorção do CH₄ no solo ao competir pela enzima mono-oxygenase. Também existe um efeito indireto da adubação nitrogenada, que é a acidificação do solo, que ultrapassa os limites inferiores de pH para as bactérias metanotróficas (BOECKX et al., 1997).

Os resultados obtidos corroboram com alguns resultados na literatura (ESCOBAR, 2008; ZANATTA, 2009; MAJUMDAR e MITRA, 2004; BOECKX et al., 1997).

5.3 Emissões de N₂O

Para todos os experimentos realizados, observou-se que os fluxos de N₂O foram de curta duração especialmente após a fertilização. Estes fluxos diminuíram significativamente após períodos de 15 dias, igualando-se, no restante dos períodos, às emissões observadas nas parcelas não adubadas. O rápido declínio das emissões de N₂O do solo após aplicação de N fertilizante é um comportamento já observado em outros estudos (ZANATTA et al., 2010, GOMES, 2006; JANTALIA et al., 2008; OLIVEIRA, 2008; CLAYTON et al., 1997). É possível que esse padrão esteja associado à rápida drenagem do solo (JANTALIA et al., 2008), às altas taxas de evapotranspiração, à baixa disponibilidade de C orgânico lábil no solo (ZANATTA et al., 2009), condições associadas ao clima de regiões tropicais, ou mesmo ao fato das aplicações de fertilizantes nitrogenados ocorrem em momentos em que a demanda por N pela planta adubada é alta, o que contribuiria para rápida redução da disponibilidade de N mineral no solo.

Ball et al. (1999) demonstraram que os fluxos de N₂O estiveram associados principalmente com o período após a fertilização e foram fortemente dependentes das chuvas. Em estudo realizado em Rondônia, Passianoto et al. (2003) encontraram fluxos de N₂O variaram em mais de 300 vezes, sendo que os maiores picos observados ocorreram justamente após a fertilização. Escobar et al. (2010) também observaram que as perdas de N₂O após a fertilização foram elevadas, sendo que o pico de emissão de N₂O apresentou-se após a primeira grande chuva e a aplicação do fertilizante. Alves et al. (2010) realizou um levantamento dos principais estudos no País relacionados a aplicação de fertilizantes e emissão de N₂O, relatando que o efeito da fertilização se restringe praticamente ao primeiro mês após a aplicação ao solo.

Os fertilizantes nitrogenados são apresentados em quatro principais formas: amoniacal (sulfato de amônio), nítrica (nitrato de sódio), nítrico-amoniacal (nitrato de amônio, nitrocálcio) e amídica (ureia).

Neste estudo, a fonte do N-fertilizante foi um fator que influenciou a magnitude das perdas de N na forma de N_2O . A utilização de ureia acarretou em maiores emissões quando em comparação com sulfato de amônio (amoniacal) em todos os ciclos estudados. Em alguns casos, a magnitude das perdas foi 3 vezes superior as observadas com sulfato de amônio. Estes resultados corroboram com os obtidos por Dobbie e Smith (2001) e Clayton et al. (1997), que observaram maiores fluxos de N_2O quando da utilização da ureia, em comparação com sulfato de amônio, porém, bem abaixo das observadas para as fontes nítricas como nitrato de amônio. Zanatta et al. (2009) encontraram emissões de N_2O menores com o uso de fontes amoniacais e amídicas que, em média, foram 50% menores do que àquelas verificadas no solo adubado com fontes de natureza nítrico.

Em teoria, somente considerando os processos biológicos envolvidos, existe um potencial para que a adubação nitrogenada com fontes amoniacais e amídicas resulte em maior emissão de N_2O do solo. No entanto, a presença de vegetação funcionando como dreno de N mineral, associado a processos de perdas por outras vias, como a volatilização de amônia e lixiviação de nitrato, fazem com que os efeitos dos tipos de fertilizantes, ou mesmo a forma de aplicação, sobre as emissões de N_2O seja variável entre diferentes estudos.

Peng et al. (2011) observaram que a fonte de N-fertilizante aplicada tem efeito direto sobre a magnitude das emissões de N_2O , e observaram que as emissões de N_2O foram maiores com a aplicação da ureia e sulfato de amônio do que quando utilizaram nitrato de sódio e nitrato de cálcio. Os autores sugeriram que a nitrificação foi o principal processo de produção de N_2O . Por outro lado, Clayton et al. (1997) e Zanatta et al. (2009) relataram maiores emissões de N_2O com fontes nítricas do que quando se aplicou ureia e do sulfato de amônio. Nos trabalhos que evidenciaram maiores emissões de N_2O nas fontes com N nítrico, em comparação as demais, reportaram que o processo de desnitrificação foi fortemente favorecido pela umidade do solo e disponibilidade de NO_3^- no solo.

Zanatta et al. (2009) compararam fontes amídicas e amoniacais e observaram maiores emissões de N_2O com a utilização do sulfato de amônio em comparação a ureia. Nos experimentos desenvolvidos nesta tese, observaram-se maiores emissões de N_2O com a utilização da ureia, mesmo havendo elevadas perdas de N por volatilização de NH_3 desta fonte. Um dos fatores que pode ter influenciado nas menores emissões de N_2O no tratamento sulfato de amônio é sua reação de acidificação quando adicionada no solo, especialmente nas áreas próximas do fertilizante. Isto pode ter ocasionado uma diminuição do pH do solo (próximo do fertilizante) e uma extrapolação do limite inferior da atividade das bactérias nitrificadoras.

Inselsbacher et al. (2011) indicam que os fluxos de N_2O do solo são dependentes da fonte a ser aplicada, pois esta relacionada a alteração da microbiota dos solos. Os autores observaram maiores emissões de N_2O derivados da utilização do nitrato de potássio e do nitrato de amônio do que quando da utilização sulfato de amônio.

No caso da ureia, as perdas de N por volatilização de amônia poderiam explicar diferenças nas emissões de N_2O , pois haveria menos N disponível no solo. No entanto, a incorporação do adubo a 5 cm de profundidade não aumentou as emissões de N_2O do solo, em relação a aplicação superficial da ureia, embora as perdas de N por volatilização de amônia tenham sido reduzidas. Allen et al. (2010) conduziu experimentos com a cultura de cana-de-açúcar fertilizadas com ureia e também não observaram mudanças quanto às emissões de N_2O do fertilizante aplicado em superfície ou incorporado ao solo.

As emissões de N_2O do solo com a aplicação de fertilizantes podem ter impacto relevante no balanço de gases de efeito estufa, e no caso das fontes energéticas, podem

neutralizar os benefícios que seriam conseguidos com a substituição da fonte de energia fóssil (CRUTZEN et al., 2008). Em adição às emissões de N_2O , deve-se considerar também que os fertilizantes nitrogenados requerem energia fóssil para síntese, processamento e transporte (ROBERTSON e GRACE, 2004), e assim, as perdas de N, após aplicação no solo, também comprometem o balanço de gases de efeito estufa.

Em vista disso, avaliou-se neste estudo se a introdução da adubação verde no sistema de produção de capim elefante substituiria a fertilização nitrogenada, tendo como referência a produtividade da cultura e as emissões de N_2O . A produtividade do capim elefante com adubação verde com feijão de porco foi semelhante a conseguida com a fertilização com ureia, porém, considerando-se as etapas de produção do adubo verde, incorporação e produção do capim elefante, houve maior produção de N_2O do que a observada com a utilização da ureia.

As maiores emissões de N_2O podem ser explicadas pelo fato de que a adição de altas quantidades de resíduos vegetais ricos em N, como os de feijão de porco, mineralizam quantidades significativas de N em um curto espaço de tempo. Estes resultados concordam com os obtidos por Aita e Giacomini (2003), que em estudos sobre rotação de culturas em áreas de plantio direto incluindo resíduos de ervilhaca, observaram maiores emissões de N_2O nestas áreas do que naquelas áreas sem leguminosas na rotação.

Aumentos das taxas de emissão de N_2O do solo após a adição de resíduos vegetais e preparo de solo têm sido atribuídos principalmente ao aporte de C e N no solo, intensificando a disponibilidade de substrato para os processos de produção de N_2O e o consumo de O_2 pela atividade aeróbica (DEL GROSSO et al., 2000; BAGGS et al., 2003; MOSIER et al., 2006). Neste estudo, o elevado volume de chuvas registrado nos primeiros 15 dias após a incorporação do feijão de porco, pode ter favorecido as maiores emissões de N_2O .

Os efeitos da adição de resíduo ao solo, sobre as emissões de N_2O , esta intimamente relacionada com a composição química dos materiais (ZANATTA et al., 2009; OLIVEIRA, 2008). BAGGS et al. (2006) indicaram que a emissão de N_2O é maior com a adição de resíduos vegetais de uma decomposição mais rápida no solo. Por isso, se espera que a adição ao solo de materiais de baixa relação C/N promova maior disponibilidade de N ao solo do que aqueles resíduos de alta relação C/N. No presente estudo, a biomassa do feijão de porco apresentou altos conteúdos de N e uma relação C/N de 12, enquanto que a biomassa de sorgo apresentou relação C/N de 65. Com isso, nas parcelas onde foram adicionados materiais de baixa relação C/N, como no caso da biomassa do feijão de porco, os fluxos de N_2O foram maiores do que aquelas onde foram incorporadas biomassa de sorgo.

5.4 Variáveis relacionadas às emissões de N_2O

No solo, as variáveis mais estudadas quanto ao potencial de influir nas emissões de N_2O do solo são o espaço poroso saturado por água (EPSA), temperatura do solo, carbono solúvel e teores de NH_4^+ e NO_3^- do solo (ZANATTA et al., 2010; CLAYTON et al., 1997; OLIVEIRA, 2008). Além dos fatores mencionados, alguns outros que afetam a atividade microbiana são importantes para os processos de desnitrificação e nitrificação, como o pH, a qualidade da matéria orgânica, a textura e a drenagem do solo (DOBBIE e SMITH, 2001).

O entendimento da influência destes fatores sobre as emissões de N_2O do solo ainda não é bem definido na literatura. Para este tipo de avaliação, reuniram-se todos os dados dos quatro experimentos realizados.

No presente estudo, não foi observada correlação significativa entre as emissões de N_2O e os valores de EPSA no solo (Tabela 11), embora exista tendência da ocorrência dos maiores fluxos de N_2O , em condições de maiores valores de EPSA do solo (Figura 37).

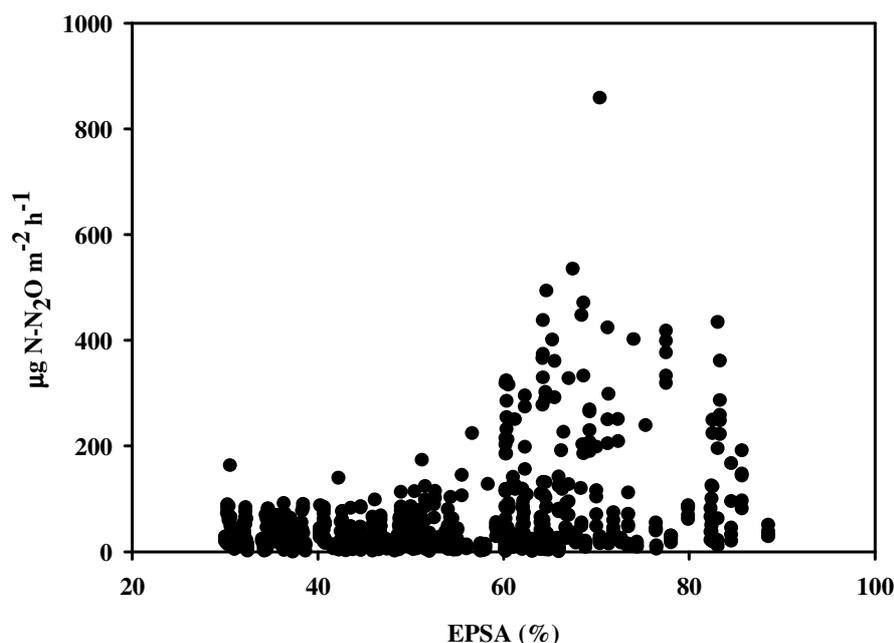


Figura 37. Relação entre os fluxos de N_2O e espaço poroso saturado com água dos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.

Na literatura, alguns resultados indicam que as emissões de N_2O são amplificadas quando a saturação por água no solo atinge níveis acima de 60 %. Nesta situação, a desnitrificação é o principal processo de emissão de N_2O . Ruser et al. (2006) demonstraram que as maiores emissões de N_2O foram encontradas com EPSA próximo de 60%. No presente estudo, como pode ser observado na Figura 36, em algumas coletas o EPSA estava acima de 80 % porém, com fluxos abaixo de $200 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, enquanto em alguns casos, o EPSA estava com valor de 60 % e os fluxos acima de $500 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, indicando que a magnitude dos fluxos de N_2O é resultado de uma combinação de variáveis, e para conseguir avaliar o efeito do EPSA seria necessário que as demais variáveis não limitassem o processo. Por outro lado, para condições específicas, alguns trabalhos mostram o claro efeito do EPSA sobre os fluxos de N_2O (DICK et al., 2001; PARKIN e KASPAR, 2006).

Em condições de campo, Jantalia et al. (2008) não encontraram qualquer relação entre o aumento da umidade provocada por eventos de chuvas com o aumento do fluxo de N_2O , em experimento realizado no Sul do Brasil. Nessa ocasião, mesmo sob chuvas intensas (acima de 60 mm por dia), o EPSA médio não passou dos 40%, alcançando 80% em poucas ocasiões, sugerindo que havia outros fatores limitando o processo.

Outro fator que pode ter influenciado a magnitude das emissões de N_2O é a disponibilidade de N mineral no solo (Figura 38 e Figura 39). A análise de correlação de Pearson entre emissão de N_2O e teores de NO_3^- e NH_4^+ do solo foi significativa a 5 % de probabilidade (Tabela 11). Esta tendência corrobora com alguns trabalhos de literatura que já reportaram que o suprimento de N para as plantas, através da adubação e/ou da mineralização da matéria orgânica do solo, aumenta as emissões de N_2O (SIQUEIRA NETO, 2006).

O fato da disponibilidade de NH_4^+ no solo estar relacionada significativamente com as emissões de N_2O (Figura 39 e Tabela 11) indica que os maiores fluxos de N_2O ocorreram em logo após a adição de fontes amoniacais, e estavam associados à estimulação da nitrificação e desnitrificação do amônio acumulado no solo. A maioria dos trabalhos de literatura, realizados em condições tropicais, indicam que o processo de desnitrificação é o principal responsável pelas emissões de N_2O do solo (JANTALIA et al., 2008; AITA e GIACOMINI,

2006). Porém, também existem trabalhos indicando que o processo de nitrificação pode influenciar significativamente estas perdas (ZANATTA et al., 2010).

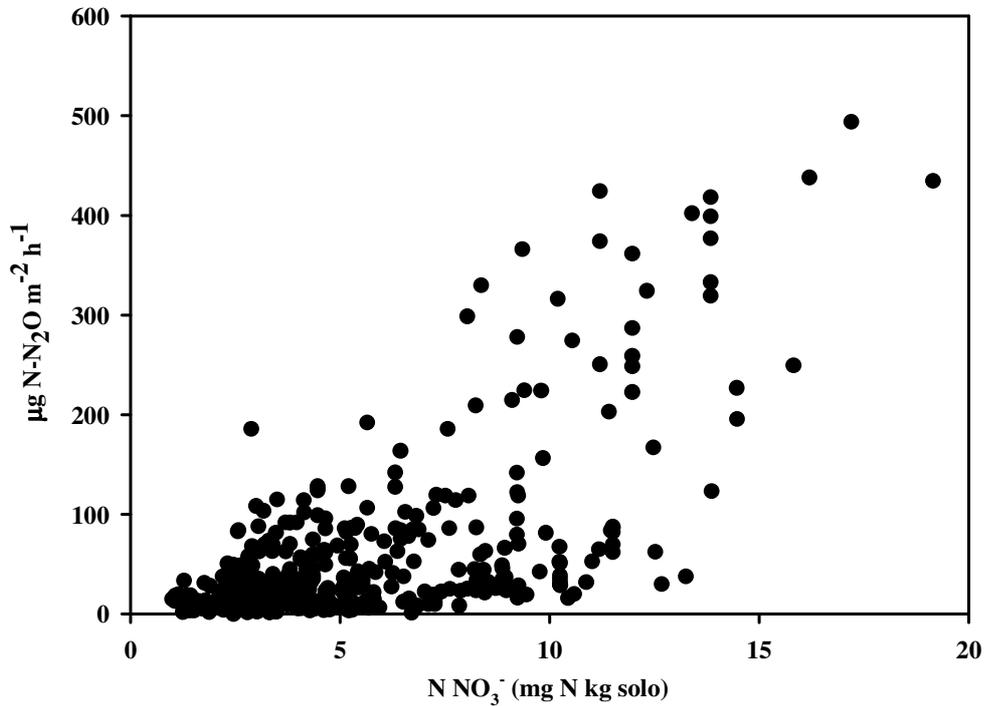


Figura 38. Relação entre os fluxos de N_2O e teores de nitrato do solo (10 cm) observados nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.

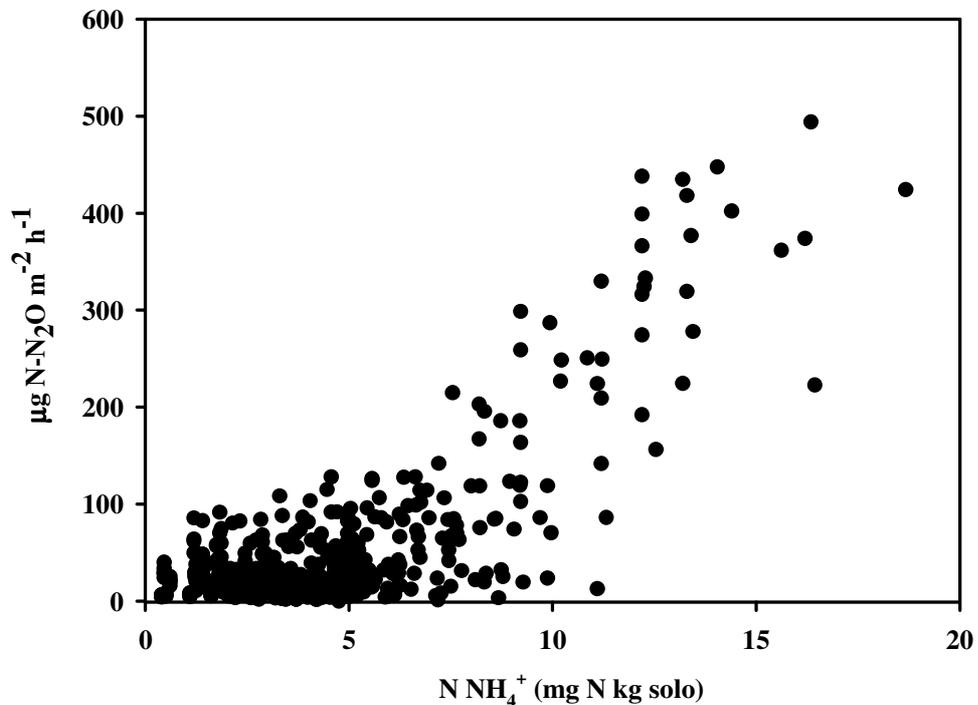


Figura 39. Relação entre os fluxos de N_2O e teores de Amônio (10 cm) observados nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.

Outro fator que certamente influenciou as emissões de N₂O foi a temperatura do solo (Figura 40), embora na análise de correlação de Pearson não tenha sido observada significância (Tabela 11). Os efeitos da temperatura sobre a produção de N₂O são descritos pelo índice Q₁₀, que representa a variação esperada nos fluxos de N₂O para uma variação da temperatura em 10°C. Para a respiração do solo, o Q₁₀ encontrado em vários estudos varia de pouco menos do que 1,5 a quase 4, e no caso do N₂O, essa faixa é comum, mas existem resultados bem superiores, acima de 10 (SMITH et al., 2003). Como mencionado anteriormente, como as emissões de N₂O são influenciadas por muitas variáveis do solo e do clima, nem sempre se consegue estabelecer uma relação de fluxos de N₂O com uma única variável, neste caso a temperatura do solo.

A temperatura do solo também é importante por provocar grandes variações diurnas nos fluxos de N₂O (SMITH et al., 2003). Tentou-se evitar esses efeitos diurnos da temperatura, realizando-se as amostragens em um mesmo horário do dia, levando em conta o mais adequado onde existe a maior probabilidade de ocorrência do fluxo médio diário de N₂O (ALVES et al., 2011).

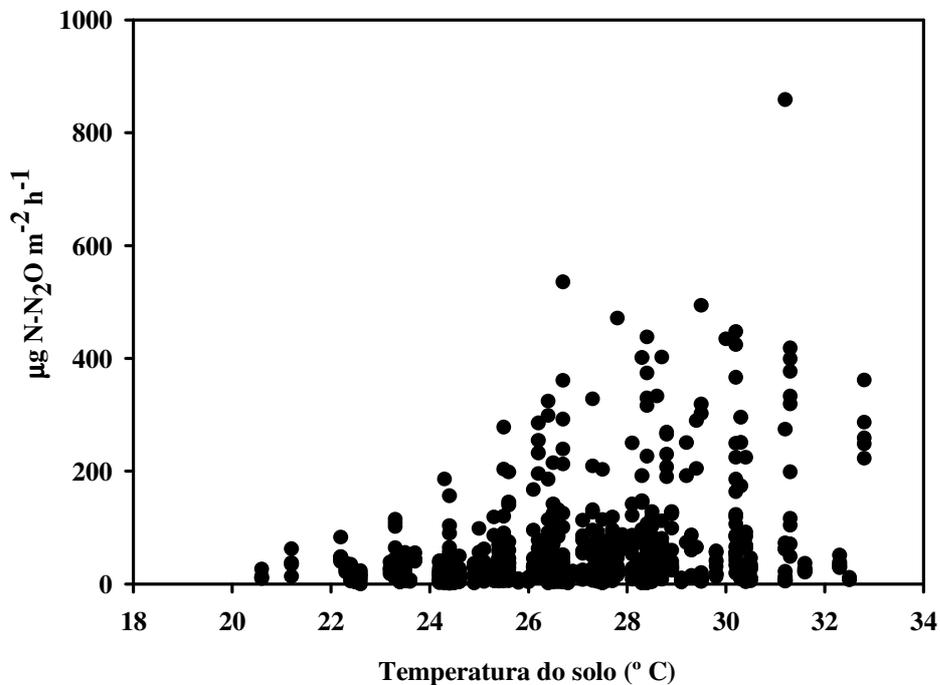


Figura 40. Relação entre os fluxos de N₂O e a temperatura do solo obtidos dos experimentos I, II, III e IV conduzidos em um Argissolo cultivado com capim-elefante em Seropédica-RJ.

A relação positiva entre as características do solo, especialmente os teores de NO₃⁻ e NH₄⁺ do solo, fortalecem a hipótese de que os processos de nitrificação e desnitrificação podem estar atuando em conjunto sobre as emissões de N₂O observadas nesta tese (Eq. 1).

Equação 1.

$$N_2O (\mu g N m^{-2} h^{-1}) = -198,6 + (0,47 * EPSA) + (6,17 TSOLO) + (8,7 NO_3^-) + (3,97 NH_4^+) \\ (R^2 = 0,29, n = 490, P < 0,01).$$

Tabela 11. Coeficientes de correlação de Pearson entre os fluxos de N₂O, espaço poroso saturado com água (EPSA), teores de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) e N mineral total obtidos nos experimentos I, II, III e IV conduzidos em Argissolo em Seropédica – RJ.

	N-N ₂ O	EPSA	T Solo	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	N total
N-N ₂ O	1,000					
EPSA	0,34	1,000				
T Solo	0,33	0,51	1,000			
NO ₃ ⁻	0,70*	0,39	0,29	1,000		
NH ₄ ⁺	0,77*	0,31	0,41	0,84*	1,000	
N total	0,82*	0,38	0,35	0,81*	0,870*	1,000

* Correlação significativa ao nível de significância de 0,05.

5.5 Fatores de Emissão para N₂O do Fertilizante

Todos os tratamentos apresentaram estimativas de fator de emissão direta de N₂O (FE-N₂O) abaixo da utilizada na guia do IPCC para inventário de emissões de N₂O de solos agrícolas (IPCC, 2006) (Tabela 12). Alves et al. (2010b) avaliaram as estimativas da proporção do N de fertilizantes que foi emitida como N₂O, e encontraram um FE-N₂O médio de 0,32 com um intervalo de confiança entre 0,18 e 0,58. Os autores concluíram que, embora a estimativa não seja robusta o suficiente como proposta para o Brasil, existe forte evidência de que as emissões de N₂O pelo uso de fertilizantes em solos usados na agricultura Brasileira sejam mais baixas do que as implícitas no fator de emissão direta do IPCC.

Tabela 12. Fatores de emissão para N₂O de todos os tratamentos testados nos três ciclos do capim-elefante.

Tratamento (kg de N ha ⁻¹)	Emissão de N ₂ O	Fator de emissão para N ₂ O (FE1)*
	(kg ha ⁻¹)	%
1° Ciclo		
40 (Ureia)	0,073	0,182
80 (Ureia)	0,173	0,216
120 (Ureia)	0,265	0,221
160 (Ureia)	0,597	0,373
2° Ciclo		
50 (Ureia)	0,140	0,28
100 (Ureia)	0,408	0,41
150 (Ureia)	0,493	0,33
100 (Sulfato de amônio)	0,096	0,10
3° Ciclo		
Ureia Enterrada	0,704	0,88
Ureia Superficial	0,574	0,72
Sulfato de amônio	0,250	0,31
FE 1 Médio (%)	0,37 (0,23 a 0,50)	

Alguns estudos indicam que o FE pode ser variável em função do tipo de solo, do ambiente e do manejo dado às culturas (SNYDER et al., 2007; JANTALIA et al., 2008). Esta grande variação nos resultados evidencia a dificuldade de se estabelecer fatores de emissão de N₂O globais.

Os resultados obtidos nesta tese reforçam os resultados encontrados por Jantalia (2005) em Latossolo, e de Oliveira (2008) em Argissolo. Os autores encontraram fatores de emissão médio na ordem de 0,45 e 0,5 respectivamente, e atribuíram o fato à boa drenagem desses solos.

No nosso estudo, realizado em um Argissolo Vermelho Amarelo, mesmo considerando a larga incerteza associada ao cálculo do fator de emissão, em várias ocasiões foram observados fatores de emissão abaixo do valor mínimo de 0,3% (Tabela 12). Os fatores de emissão não foram maiores porque, pode-se considerar que estes solos são bem drenados, o que permite que o solo alcance EPSA acima de 60% com menos freqüência. Os resultados observados nesta tese, em conjunto com alguns dados de literatura, indicam que o FE proposto pelo IPCC de 1,0 % esta superestimando as medidas em condições tropicais.

5.6 Fatores de Emissão para N₂O dos Resíduos

Fatores de emissão provenientes dos resíduos vegetais das espécies feijão de porco e sorgo, utilizados para pré-plantio do capim-elefante no experimento IV, foram calculados considerando-se as emissões obtidas a partir da incorporação dos resíduos ao solo até o momento da aplicação do fertilizante nitrogenado, quando os fluxos derivados da adição do resíduo não apresentavam diferença da área controle, com resíduos de plantas espontâneas.

Considerando-se as quantidades de N₂O emitidas acima da observada na área controle, encontrou-se que 0,4 e 2,3 %, do N dos resíduos de sorgo e feijão de porco, respectivamente, foram emitidos como N₂O.

Os resultados obtidos para os resíduos de sorgo corroboram com alguns apresentados na literatura. Harrison et al. (2002) encontraram o fator de emissão (FE) de N₂O de 0,62 % para resíduos de aveia, ervilha e beterraba. Oliveira (2008) encontrou FE para resíduos de milho e soja de 0,4 %. No presente trabalho, os fatores de emissão observados para os resíduos de feijão de porco foram muito superiores aos obtidos para resíduos de sorgo. Isto pode estar associado à natureza química destes materiais, especialmente relação C/N, bem mais baixa no feijão de porco (12) do que no sorgo (65).

Novoa e Tejeda (2006) destacam que as emissões de N₂O são mais significativas quando são aplicados resíduos com menor relação C:N, e mostraram um aumento na desnitrificação com o aumento do conteúdo de N e redução da relação C:N do resíduo.

5.7 Influência da Leguminosa nas Emissões de N₂O do Solo

Estudos realizados nas décadas de 70 e 80 indicaram que o processo de FBN teria relação direta com as emissões de N₂O (BREMNER et al., 1980). Tais estudos ganharam maior destaque após a descoberta de que existiam determinadas bactérias do gênero rizóbio que eram capazes de desnitrificar (O'HARA e DANIEL, 1985). Mais recentemente, essa característica tem sido evidenciada sobre algumas estirpes utilizadas como inoculantes em leguminosas, como no caso da soja por exemplo (FERNÁNDEZ et al., 2008). Estudos recentes conduzidos pela Embrapa Agrobiologia confirmam essa característica para várias estirpes de *Bradyrhizobium* spp. utilizadas como inoculantes em leguminosas, e mostraram diferenças entre as estirpes na capacidade de desnitrificar e produzir N₂O em meio de cultura (ALVES et al., 2010a). No entanto, o que não se conseguiu provar em definitivo é a relação direta da FBN com as emissões de N₂O (ROCHETTE e JANZEN, 2005). Alves et al. (2010a) relatam estudo realizado com a cultura da soja, em que a diferença da emissão acumulada de N₂O em solo cultivado com soja fixadora de N₂ e soja não nodulante foi pequena. Os autores consideraram que embora muitas bactérias sejam capazes de desnitrificar, as emissões de N₂O são provenientes do N disponível do solo e não diretamente do processo de FBN.

Neste trabalho, os resultados mostraram que o período em que os fluxos de N_2O foram mais elevados na área em que feijão de porco se desenvolvia, as concentrações de N mineral também foram mais elevadas do que quando comparada com a área plantada com sorgo.

Após 60 DAP, as emissões de N_2O na área com feijão de porco diminuíram significativamente e os teores de N mineral também, enquanto que o processo de FBN continuou representando a principal fonte de N desta leguminosa. A contribuição da FBN para feijão de porco diminuiu a demanda da cultura pelo N mineral do solo, que se manteve em concentrações mais elevadas, processo conhecido como efeito de reserva de N (CHALK, 1998). Se a magnitude da concentração de N mineral do solo tem relação direta com a dependência da leguminosa pela FBN, se poderia afirmar que a FBN tem relação direta com as emissões de N_2O . No entanto, não foi possível avaliar essa questão, podendo-se apenas sugerir que a FBN não esteja relacionada diretamente com a emissão de N_2O .

JENSEN et al. (2011) realizaram uma revisão sobre o papel das leguminosas na mitigação das emissões de GEE. O objetivo deste trabalho foi reunir o conhecimento atual sobre a capacidade de leguminosas em mitigar emissões de CO_2 e N_2O . Nesta revisão, os autores evidenciaram que os aumentos das emissões de N_2O em áreas cultivadas por estas plantas não estão associados à FBN associada à cultura, e sim a disponibilidade de N mineral no solo. Esta hipótese corrobora com a apresentada neste estudo e no trabalho relatado por Alves et al. (2010).

Por outro lado, Jensen et al. (2011) colocam as plantas leguminosas como plantas estratégicas para diminuição do uso de fertilizantes nitrogenados em sistemas agrícolas. No entanto, no presente estudo, a emissão acumulada de N_2O no tratamento em que foi utilizada a adubação verde, bem superior ao tratamento com ureia, não foi eficaz em mitigar as emissões de GEEs do fertilizante.

5.8 Volatilização de Amônia

No presente estudo as perdas por volatilização de NH_3 foram maiores quando a ureia foi utilizada em cobertura, em comparação com a utilização do sulfato de amônio e com a ureia incorporada ao solo. Quanto à magnitude da volatilização, para todos os experimentos, observou-se que as perdas foram maiores nos três primeiros dias, ultrapassando em alguns casos 60% do N aplicado. Segundo Cantarella et al. (2003) cerca de 90% da volatilização de NH_3 ocorre nos primeiros seis dias da aplicação do fertilizante. Resultados similares foram obtidos por Araújo et al. (2009).

As perdas por volatilização de NH_3 mostraram que o processo pode afetar significativamente a eficiência da utilização de fertilizantes nitrogenados quando aplicados superficialmente ou a lanço, especialmente quando se utiliza ureia como fonte de N.

A ureia quando aplicada é rapidamente hidrolisada, geralmente em 2 ou 3 dias, dependendo da temperatura do ambiente (BYRNES, 2000). Outro fator que influencia a hidrólise da ureia é a umidade do solo. Com o aumento do teor de umidade do solo, a taxa de hidrólise da ureia é elevada, até que a umidade alcance 20%, a partir do qual a taxa de hidrólise é pouco alterada com o aumento da umidade (BREMNER e MULVANEY, 1978).

Sangoi et al. (2003) destacam que a quantidade de N perdido por volatilização é dependente da fonte e da forma de aplicação do fertilizante. Além disso, ressalta que após a aplicação de ureia as perdas podem atingir valores extremos de até 78 % do N aplicado. Outros fatores citados pelo autor que podem influenciar estas perdas são o pH do solo, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e cobertura vegetal.

Segundo Martha Júnior (2003), as perdas por volatilização de NH_3 do solo estão diretamente relacionadas 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 nas perdas, embora outros fatores como incidência e velocidade do

vento também influenciem. Testando as perdas de N-NH₃ por volatilização, Trivelin et al. (1997) verificaram que a solução Uran (combinação de ureia com nitrato de amônio) apresentou menores perdas por volatilização quando comparada à aplicação de ureia.

Chen et al. (2007) observaram que quando o fertilizante é aplicado superficialmente, a volatilização de NH₃ é controlada pela temperatura do solo e velocidade do vento, enquanto que aplicada em profundidade, os fatores que regulam o processo de volatilização são temperatura e umidade do solo, CTC e a profundidade de aplicação.

A incorporação da ureia diminuiu significativamente a volatilização de amônia neste trabalho, tal como observado por Lara Cabezas et al. (1997) e Sangoi et al. (2003). Esses autores consideraram que o maior contato entre o fertilizante e o solo favoreceu a adsorção de NH₄⁺ às cargas negativas do solo. Além disto, segundo os autores, ao se difundir no solo, a amônia pode encontrar sítios com valores de pH menores que aqueles existentes ao redor dos grânulos de ureia, e pode se transformar em amônio, que não é volátil. Fontoura e Bayer (2010) encontraram resultados semelhantes ao deste estudo, em que houve redução significativa das perdas por volatilização de NH₃ quando foi feita incorporação da ureia ou utilização do sulfato de amônio como fonte de N.

Além da questão de eficiência de recuperação do N derivado de fertilizante pela planta, a contabilidade das emissões de N₂O pelo uso de fertilizante nitrogenado leva em conta as quantidades de N perdidas por volatilização de amônia. Segundo o IPCC (2006), 10 % de todo o N aplicado como fertilizante é volatilizado na forma de NH₃. Calculada a quantidade de N volatilizada, outro fator de emissão default é aplicado para calcular a emissão indireta de N₂O que ocorreria após deposição do N volatilizado. Considerando-se os resultados obtidos, a percentagem de N volatilizado média obtida dos quatro experimentos conduzidos foi de 34%, bem superior da que é considerada pelo IPCC, quando se utiliza ureia como fonte de N. Segundo o IPCC (2006), 10 % de todo o N aplicado como fertilizante é volatilizado na forma de NH₃. Este fator foi baseado em vários estudos realizados em condições temperadas, especialmente nos experimentos relatados por Bouwman (1996). Em condições tropicais, poucos estudos ainda relatam a magnitude destas perdas, o que indica a necessidade da realização de mais estudos. Os resultados obtidos nesta tese indicam que o fator proposto pelo IPCC de 10% esta subestimado, já que em média, 45% da ureia aplicada foi perdida por volatilização de NH₃.

Na literatura são escassos os trabalhos que avaliem as perdas de N de fertilizantes recobertos por polímeros, que é considerada uma possibilidade de mitigação de perdas (MOSIER et al., 1994). No trabalho de Zavaschi et al. (2010) não foi observada diferença estatística quanto as perdas por volatilização de amônia destes fertilizantes em comparação com a ureia comercial. Também não foi detectada diferença estatística significativa para a produção de grãos. Estes resultados corroboram com os obtidos neste trabalho, pois não foi observada diferença estatística significativa quando da utilização da ureia comercial em comparação com a ureia revestida por polímero.

5.9 Produção e Características Qualitativas da Biomassa

Na literatura, os trabalhos com capim-elefante mostram uma resposta favorável à fertilização nitrogenada. ANDRADE et al. (2005), em estudos com capim elefante para alimentação de bovinos, observaram que a produção de biomassa aumenta linearmente as doses de N fertilizante aplicadas, que foram 100, 300 e 450 kg ha⁻¹ de N. Em Queiroz Filho et al. (1998), foram encontradas produtividades de 39 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca com uma adubação de 100 kg de N ha⁻¹, na forma de sulfato de amônio. Sabe-se que a fertilização é essencial a manutenção das produtividades. No caso da alimentação animal, esta prática traz a melhoria da qualidade da biomassa para o sistema, aumentando-se os conteúdos de proteína da biomassa (PACCIULLO et al., 2011).

Por outro lado, para o caso de sistemas de produção bioenergéticos, os estudos que avaliam o efeito da fertilização, sobre a qualidade da biomassa, ainda são incipientes. Em capim-elefante alguns ensaios foram realizados por Flores (2009) e Zanetti (2010). Os autores não encontraram influência significativa do aumento dos conteúdos de N nos tecidos sobre o poder calorífico superior da biomassa, corroborando com os obtidos neste trabalho, já que não se observou diferença do PCS com o aumento dos teores de N dos tecidos.

5.10 Fixação Biológica de Nitrogênio

A contribuição da FBN para as plantas de capim-elefante variaram de 22 a 44 % do N acumulado pelas plantas, considerando todos os resultados dos 4 experimentos, com um valor médio estimado em 29 %. Esses resultados corroboram também com alguns obtidos na literatura, como os de Quesada (2005), Morais et al. (2009; 2011). Em todos esses trabalhos, as estimativas de FBN para capim-elefante, genótipo Cameroon, variaram entre 35 e 50 %. Morais et al. (2011) quantificaram contribuições da FBN que, em média, foram de 38 % para o genótipo Cameroon, o mesmo utilizado neste estudo.

5.11 Emissão de N₂O por Tonelada de Biomassa Seca Produzida

No primeiro ciclo de estudo foi observado que somente quando foi feita a aplicação da dose de 40 kg ha⁻¹ de N, houve menor emissão de N₂O por tonelada de biomassa produzida (Figura 41). Para as condições experimentais, observou-se um ajuste exponencial significativo para as demais doses estudadas. Estes valores são dependentes da produtividade da cultura, que por sua vez, dependem das condições edafoclimáticas, assim como as perdas de N, que contribuem para diminuir a eficiência do sistema de produção.

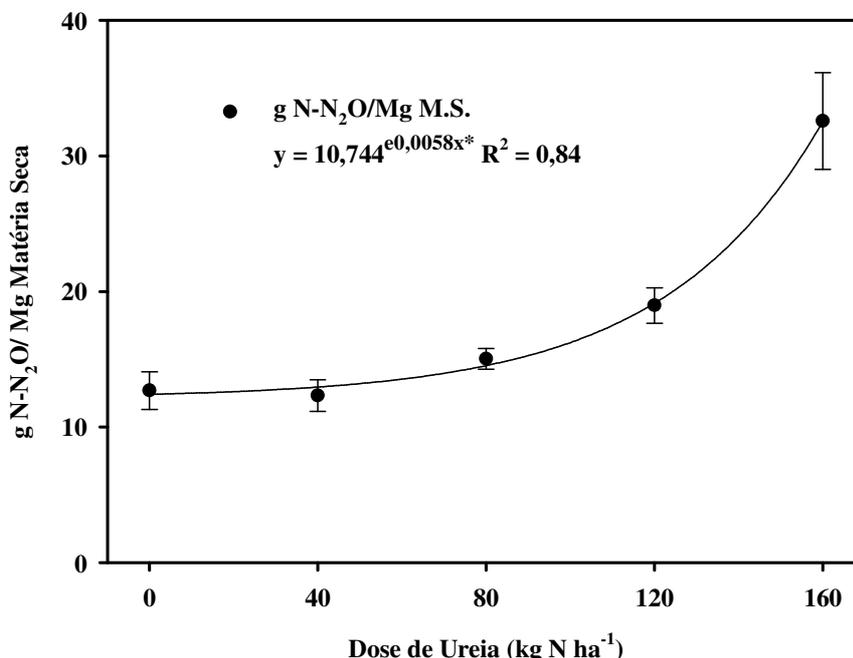


Figura 41. Emissão de N-N₂O por tonelada de matéria seca do primeiro experimento de capim-elefante cultivado sob diferentes doses de N-fertilizante na forma de Ureia. * Significativo a 5% de probabilidade

Por outro lado, as práticas de manejo do fertilizante podem aumentar a eficiência do sistema. No segundo e no terceiro experimento, a utilização do sulfato de amônio proporcionou menores emissões de N₂O por tonelada de biomassa produzida (Tabela 13).

Tabela 13 Emissão em de N-N₂O por tonelada de matéria seca do primeiro experimento de capim-elefante cultivado sob diferentes doses de N-fertilizante na forma de Ureia. * Significativo a 5% de probabilidade.

Tratamento	g N-N ₂ O ha ⁻¹	Biomassa total Mg de MS ha ⁻¹	g N-N ₂ O/ Mg de M.S*
2° Ciclo			
Controle	590,3 c	22,7 b	26 b
50 U	730,7 ab	28,1 a	26 b
100 U	998,6 a	29,2 a	35,5 a
150 U	1.083,9 a	30,6 a	35,4 a
100 S.A	686,5 bc	30,4 a	23 b
Média	289,3	29,0	30
CV (%)	26,3	21,2	25,5
3° Ciclo			
Controle	763 c	16,95 b	45 b
U.S.	1468 a	21,07 a	69,7 a
U.E.	1338 a	24,01 a	55,8 a
S.A.	1014 b	23,12 a	43,8 b
Média	406,9	37,4	53,6
CV (%)	22,1	23,3	18,5

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade. U.S.-Ureia Superficial; U.E.-Ureia enterrada; S.A.- Sulfato de Amônio

No quarto experimento foi realizada uma comparação entre a utilização de adubos verdes em pré-plantio do capim-elefante com a fertilização nitrogenada. Infelizmente, houve problemas com os dados de N₂O derivados da fertilização uma vez que ocorreu a queima do HD do computador acoplado ao Cromatógrafo que continha os dados. Portanto na comparação entre a adubação verde e os fertilizantes, considerou-se o fluxo médio de N₂O da área de pousio para todos os tratamentos no período correspondente entre a fertilização e a colheita da biomassa do capim. Porém no tratamento que correspondeu a utilização da ureia, a emissão de N₂O nesse período pós fertilização foi calculada com os fatores de emissão direta e indireta para N₂O propostos pelo IPCC (1996). Para esta comparação, considerou-se também que cada kg de fertilizante nitrogenado, houve a emissão de 4,5 kg de CO₂ de origem fóssil, relacionados a síntese, processamento e transporte do fertilizante.

Neste experimento foi observado que a utilização da adubação verde em pré-plantio do capim acarretou em uma emissão de 156 g N-N₂O Mg⁻¹ de M.S, enquanto que a fertilização com ureia, foi de 156 g N-N₂O Mg⁻¹ de M.S (Figura 42). Fazendo-se uma conversão dos dados para equivalente CO₂, e considerando os custos em emissão de CO₂ da síntese e transporte da ureia, observou-se que estes valores equivaleram a 73 kg CO₂ eq Mg⁻¹ MS capim, quando se utilizou a adubação verde enquanto que quando da utilização da ureia este foi de 45 kg CO₂ eq Mg⁻¹ MS capim. Portanto, para um ciclo de capim-elefante, a adubação verde não foi mais vantajosa do que a utilização da ureia em termos de emissão de N₂O. Isso pode estar relacionado a baixa eficiência de utilização do N dos adubos verdes pelo capim-elefante.

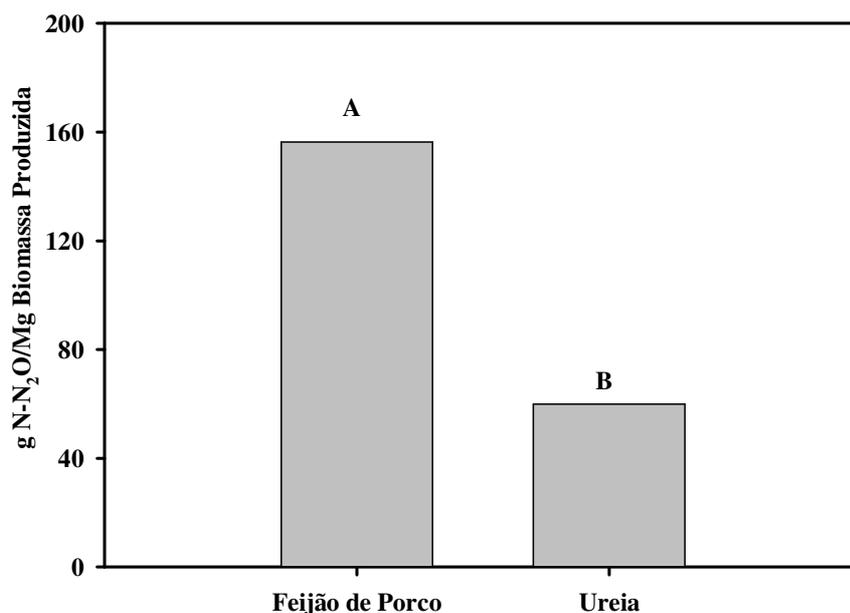


Figura 42. Emissão de N-N₂O por tonelada de matéria seca do quarto experimento de capim-elefante cultivado após a adubação verde comparada com ureia. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

5.12 Eficiência de Uso do Nitrogênio Fertilizante e dos Adubos Verdes

Pelos resultados apresentados nos experimentos I, II, III e IV, pode-se concluir que a eficiência do uso do N da ureia está em torno de 40% quando aplicada em cobertura no solo. Quando a ureia foi enterrada, diminuíram-se as perdas e por isso aumentou sua eficiência. A utilização do sulfato de amônio acarretou as menores perdas e em média a eficiência de utilização foi de 57%. Estes resultados corroboram com alguns obtidos na literatura. Fernandes (2006) encontrou resultados de recuperação 47% em grãos de milho quando usou sulfato de amônio na dose de 120 kg ha⁻¹ de N parcelado em duas doses de 60 kg N ha⁻¹. Segundo Scivittaro (2000), a maioria dos estudos mostra que o aproveitamento médio do N dos fertilizantes não ultrapassa 50%. Alves et al. (2006) encontraram que, dos 100 kg de N ha⁻¹ aplicados na forma de ureia, a EUFN pelas plantas de milho e algodão foram de 48 e 61% respectivamente. No presente trabalho a eficiência de utilização do N pelos fertilizantes ureia e sulfato de amônio e pela adubação verde (pela técnica de diferença de N total) foi de 57 e 20%. A baixa resposta da utilização do N derivado da adubação verde corrobora com alguns trabalhos de literatura.

Perin et al. (2004) observaram que o aproveitamento do N derivado de *Crotalaria juncea*, pela cultura do brócolis, foi de cerca de 10%. Na cana-de-açúcar, Ambrosano et al. (2011) observaram que a recuperação do N derivado do adubo verde foi de cerca de 20%, considerando-se duas safras, em sistema de pré-cultivo de *Crotalaria juncea*. Para essa mesma espécie de adubo verde, Silva et al. (2006) observaram que a recuperação de N pela cultura do milho foi de cerca de 15%.

Araújo et al. (2011) encontraram que o nitrogênio recuperado na biomassa do repolho no tratamento com feijão de porco foi de 16%. Os resultados obtidos por Araújo et al. (2011) corroboram com os obtidos por Ambrosano et al. (2011). Estes autores estudaram a transferência do N da mucuna preta e da *Crotalaria juncea* para a cultura do milho, e encontraram valores de eficiência de 35%.

5.13 Impacto da Fertilização e da Adubação Verde no Balanço Energético e de Gases de Efeito Estufa

Os resultados encontrados nesta tese reforçam a importância da contribuição da FBN sobre o balanço de N do sistema de produção do capim-elefante para bioenergia. A contribuição da FBN variou entre os ciclos estudados e representou em média 35% de todo o N acumulado pelas plantas. Embora tenha um importante papel sobre o balanço de N do sistema, a FBN em capim-elefante não é capaz de fornecer todo o N demandado pela cultura. Para o capim-elefante, a principal forma de reposição do N retirado do solo é através da fertilização. Porém, como o uso dos fertilizantes está associado a um aumento dos custos energéticos e ambientais, buscou-se a dose, a fonte e forma de aplicação menos impactante a cultura. Levaram-se em consideração as duas principais fontes de N fertilizantes mais utilizadas no Brasil, ureia e sulfato de amônio e a adubação verde como uma estratégia de mitigação das emissões de GEE relacionadas a ureia.

Sabe-se que as pesquisas com GEE no Brasil ainda são bem recentes, especialmente aquelas voltadas ao entendimento da dinâmica do N_2O . Isto demonstra a necessidade de mais estudos para um melhor entendimento sobre as variáveis envolvidas neste processo. Nos experimentos realizados nesta tese, observou-se que as emissões de N_2O foram grandemente afetadas pelo efeito das condições climáticas e de suas interações com a fonte do fertilizante aplicado, tornando imprescindível o monitoramento das emissões de N_2O por vários anos consecutivos e em nível regional.

Sobre este aspecto, observou-se que a utilização do sulfato de amônio foi mais vantajosa do que a utilização da ureia, pois acarretou em uma maior eficiência de utilização e em menores perdas por volatilização de NH_3 e emissão de N_2O . Incorporando a ureia, observou-se que eficiência do uso do N pelas plantas foi a mesma obtida com sulfato de amônio, porém ao incorporar o fertilizante maiores são os custos energéticos envolvidos no processo. Já a adubação verde, realizada em pré-plantio do capim-elefante, não acarretou em diminuição das emissões de N_2O quando comparada com a ureia.

Ao final de todos os experimentos, foi possível realizar um balanço de N envolvendo fontes e formas de aplicação dos fertilizantes nitrogenados e compará-los a adubação verde (Tabela 14). Levando-se em consideração as entradas e saídas de N do sistema, a utilização da dose do fertilizante de 80 kg ha^{-1} de N não foi suficiente para neutralizar as quantidades de N do solo extraídas da biomassa do capim-elefante. Mesmo considerando uma contribuição da FBN no capim-elefante de 35%, ainda ocorreria um decréscimo de N do solo de aproximadamente 50 kg ha^{-1} de N por ciclo, equivalente a $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N. Por outro lado, a entrada de N derivada da FBN no tratamento adubação verde foi suficiente para atender em termos quantitativos toda a demanda de N exportada da cultura. Porém o baixo aproveitamento do N desta fonte acarretou em menor produtividade do capim quando comparado com sulfato de amônio.

No experimento de doses de N, os resultados mostraram que a dose ideal para o capim-elefante foi de 96 kg ha^{-1} de N. Porém, mesmo com esta recomendação, o sistema ainda apresenta um balanço de N negativo. Isso ocorre principalmente porque as perdas por volatilização de NH_3 envolvidas no processo são muito altas, e por isso, sugere-se que doses superiores a esta sejam parceladas e incorporadas ao solo.

Estes tratamentos também foram comparados do ponto de vista energético. Para o cálculo do balanço de energia nos diferentes tratamentos testados (Tabela 15), foram levados em consideração o consumo de energia fóssil no preparo do solo, na colheita e na fertilização de P e K em capim-elefante (SAMSON et al., 2005). Para a adubação verde, foi somado ao custo energético total, o relacionado ao preparo do solo, plantio e a incorporação da biomassa dos adubos verdes (no anexo I). Já para a incorporação da ureia, foi somado um gasto de energia de 20% ao total de energia relacionada à fertilização nitrogenada. Considerou-se uma

emissão de 73,5 kg CO₂ para cada GJ de energia fóssil investida no processo (IPCC, 2007). Multiplicou-se este fator pela quantidade de energia fóssil do sistema em GJ (SAMSON et al., 2005) e obteve-se o total de CO₂ emitido para a implantação do capim em todos os tratamentos. As emissões de N₂O decorrentes das práticas de manejo obtidas no campo experimental foram convertidas a CO₂ eq. Considerou-se para os fertilizantes a emissão de 450 kg de CO₂ para cada 100 kg de N utilizado, decorrente do consumo de energia fóssil na síntese, processamento e transporte. Considerou-se também que para cada tonelada de biomassa de capim produzido e utilizado para queima direta, produz-se 17,67 GJ de energia.

Tabela 14. Balanço de N do sistema solo-planta em um Argissolo cultivado com capim-elefante adubado com ureia (superficial e enterrada), sulfato de amônio e com adubação verde realizada em pré-plantio da cultura.

Tratamento	Entradas	Saídas			Balanço
		Perdas		Planta	
		NH ₃	N ₂ O		
kg ha ⁻¹ de N					
Ureia superficial	80	36	0,70	147	-103
Ureia enterrada	80	22	0,57	174	-117
Sulfato de amônio	80	16	0,25	176	-113
Adubação verde *	130	-----	3,77	179	-52

* Somente a quantidade de N derivada da FBN.

Os maiores consumos de energia foram observados nos sistemas com adubação verde e ureia enterrada, com um total de 21,6 e 23,6 GJ de energia respectivamente, e de 19,6 GJ para ureia superficial e sulfato de amônio. O total de CO₂ eq emitido nestes sistemas foram de 3342, 2490, 2353 e 2047 kg CO₂ eq respectivamente. Quando realizada uma relação com a MS produzida pelo capim em todos os tratamentos, observou-se 0,14 e 0,11 kg CO eq/Mg de MS de capim para os tratamentos adubação verde e ureia superficial, respectivamente. A utilização do sulfato de amônio acarretou nas menores relações CO_{2eq}/MS e CO_{2eq}/GJ de energia produzida.

Tabela 15. Emissão de CO₂ eq por tonelada de biomassa seca de capim elefante adubado com ureia (superficial e enterrada), sulfato de amônio e adubação verde realizada em pré-plantio da cultura.

Tratamento	Matéria seca	Consumo Energia fóssil*	CO ₂ Energia Fóssil*	CO ₂ eq Derivado do campo	CO ₂ eq Total**	CO ₂ eq por Mg de M.S. de capim
	Mg ha ⁻¹	GJ há ⁻¹		kg CO ₂ eq		
Adubação verde	24	21,6	1589	1754	3342	0,139
Ureia superficial	21,2	19,6	1443	911	2353	0,111
Ureia Enterrada	26,5	23,6	1732	749	2480	0,094
Sulfato de Amônio	25,8	19,6	1443	605	2047	0,079

*Obtido através da relação de 73,5 kg CO₂ por GJ de energia fóssil consumida (IPCC, 2006).

** CO₂ derivado da energia fóssil investida para produção do capim somado o CO₂ eq derivado das emissões de GEE no campo.

A maior produção de matéria seca e energia gerada por hectare foram obtidas com a aplicação da ureia enterrada (468 GJ ha⁻¹), seguida da utilização do sulfato de amônio (456 GJ ha⁻¹) (Tabela 16). Com a adubação verde e ureia aplicada superficialmente, foram produzidas 424 e 374 GJ ha⁻¹ de energia, respectivamente. Nesta ocasião, foram emitidos um total de 3342, 2353, 2480 e 2047 kg CO eq para os tratamentos adubação verde, ureia superficial, ureia enterrada e sulfato de amônio.

Para atender a mesma quantidade de energia gerada em 1 hectare de capim-elefante, considerando o tratamento sulfato de amônio, as emissões utilizando gás natural, óleo diesel e carvão mineral foram de 23250, 33279 e 40118 kg de CO₂ respectivamente.

Sob o aspecto de mitigação de GEE de fontes fósseis, os resultados mostram que embora as práticas de manejo como ureia aplicada em superfície ou adubação verde acarretem em maiores emissões de CO₂ eq, estes não influenciam de forma significativa quando se trata do potencial de mitigação relacionado a fontes fósseis de energia. Isso se deve ao fato do balanço de energia da cultura já ser bastante positivo. Os balanços de energia para os tratamentos adubação verde, ureia superficial, ureia enterrada e sulfato de amônio foram de 20:1, 19:1, 20:1 e 23:1 respectivamente.

De acordo com Boddey et al. (2008), quando o balanço energético de uma cultura é bastante alto (acima de 8), as diferenças de 1 ou 2 unidades ocasionam pequenas diferenças na economia de fontes fósseis de energia. Isto significa dizer que se um bicomustível tem um balanço de energia de 5, isso pode representar uma economia em energia fóssil de 80%. Porém, fazendo-se um esforço e elevando este balanço energético de 5 para 10, isso representará apenas uma economia de energia fóssil de 10%.

Tabela 16. Comparação da emissão de CO₂ eq entre algumas fontes fósseis de energia com a biomassa do capim-elefante adubado com ureia (superficial e enterrada), sulfato de amônio e com adubação verde realizada em pré-plantio.

Tratamento	Matéria seca e produção de energia com capim elefante		CO ₂ Capim Elefante	CO ₂ Gás Natural ¹	CO ₂ Óleo Diesel ²	CO ₂ Carvão Mineral ³
	Mg ha ⁻¹	GJ ha ⁻¹ *	kg CO ₂ **			
Adubação verde	24	424,1	3342	21628	30958	37319
Ureia superficial	21,2	374,6	2353	19104	27346	32965
Ureia Enterrada	26,5	468,3	2480	23881	34182	41206
Sulfato de Amônio	25,8	455,9	2047	23250	33279	40118

* Considerou-se 17,67 GJ de energia por tonelada de biomassa queimada (SAMSON et al., (2005);

** Emissão de CO₂ quando atendida a mesma demanda de energia conseguida em 1 hectare com capim-elefante em GJ ha⁻¹.

¹ 51 kg CO₂ por GJ usado como gás natural (IPCC, 2007);

² 73 kg CO₂ por GJ na forma de óleo diesel(IPCC, 2007);

³ 88 kg CO₂ por GJ na forma de óleo diesel(IPCC, 2007)

6. CONCLUSÕES

A cultura do capim-elefante produz entre 17 e 30 Mg ha⁻¹ de biomassa seca em intervalos de corte de 6 meses, sendo as maiores produtividades conseguidas com a adição de fertilizante nitrogenado, ou após adubação verde com leguminosa. Na condição não fertilizada com N, a produção de biomassa situa-se entre 17 a 23 Mg ha⁻¹ de matéria seca, ou entre 35 e 40 Mg ha⁻¹ de matéria seca por ano, sendo a FBN associada ao capim, responsável por 29 %, em média, do N acumulado pela planta.

Considerando as condições experimentais dos estudos apresentados, a dose de ureia que permitiu máxima produtividade de capim-elefante, em dose única, foi de 96 kg ha⁻¹ de N, e a aplicação do fertilizante não afetou a qualidade da biomassa de capim-elefante para geração de energia.

O fator médio de emissão direta de N₂O associados ao uso de fertilizante nitrogenado para o capim-elefante, conseguidos no presente estudo, independente da dose e forma aplicada, foi de 0,37%, com um intervalo de confiança de 0,23 a 0,50 %, portanto, inferior ao FE de 1%, estipulado pela metodologia do IPCC. Em contrapartida, o total de N volatilizado com aplicação de ureia em superfície variou de 38 a 57 %, superior ao estipulado pelo IPCC para fertilizantes nitrogenados (10 %) para estimativas das emissões indiretas de N₂O. No entanto, a incorporação da ureia ao solo ou a utilização de sulfato de amônio reduzem essas perdas de 50 a 65 %.

A utilização do sulfato de amônio ou a incorporação de ureia acarreta em menores perdas por volatilização de NH₃ e emissão de N₂O, e maiores ganhos de produtividades de biomassa do capim-elefante. A ureia revestida com polímero, fornecida pela empresa Kimberlit, diminui, em relação à ureia comercial, as perdas de NH₃ em 7%, e não apresenta influência sobre a produtividade do capim-elefante.

A utilização da adubação verde em pré-plantio do capim-elefante aumenta as emissões de N₂O em comparação com a ureia, porém essas emissões não alteram significativamente o balanço de GEE do sistema de produção do capim-elefante utilizado em queima direta para produção de calor.

A FBN associada ao capim elefante não é suficiente para atender toda a necessidade de N da cultura, e por isso, o uso de fertilizantes ou de adubação verde é essencial para manter a produtividade de biomassa em longo prazo, sendo que o impacto ambiental causado por estas práticas pode ser reduzido em função da fonte e da forma aplicada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.601- 612, 2003.
- AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Plantas de cobertura do solo em sistemas agrícolas. In: ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTÁLIA, 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: Genesis, cap. 3, p. 59-80, 2006.
- ALCÂNTARA F.A.; NETO A.E.F.; PAULA M.B.; MESQUITA H.A.; MUNIZ J.A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p. 277-288, 2000.
- ALLEN, G.; KINGSTON, H.; RENNENBERG, R.; SCHMIDT, S. Effect of nitrogen fertiliser management, water logging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils. **Agricultural Ecosystems and Environmental**, v.136, p. 209–217, 2010.
- ALVES, B.J.R.; SMITH, K.A.; FLORES, R.A.; CARDOSO, A.F.; OLIVEIRA, W.R.D.; JANTÁLIA, C.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.46, p. 129–135, 2012.
- ALVES, B.; CARDOSO, A.S.; LESSA, C.R.; PAREDES, D.; JANTÁLIA, C. P.; SANTOS, H.P.; FRANCHINI, J.C.; URQUIAGA, S.; Boddey, R. M. **A fixação biológica de nitrogênio não é uma fonte direta de N₂O de solos agrícolas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010a. 4p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 125).
- ALVES, B.; JANTÁLIA, C. P. ; MADARI, B.E. ; MACHADO, P L O A ; FRANCHINI, J. C. ; dos Santos, Henrique P. ; Boddey, R. M. ; URQUIAGA, S. **Emissões de óxido nitroso de solos pelo uso de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2010b. 4p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 126).
- ALVES, B.J.R. ; ZOTARELLI, L. ; FERNANDES, F. M. ; HECKLER, J. C. ; MACEDO, R. A. T.de ; BODDEY, R. M. ; URQUIAGA, S. . Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 449-456, 2006.
- 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.
- AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; MURAOKA, T.; ROSSI, F. ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. **Scientia Agricola**, v.68, p.361-368, 2011.

ANDRADE, A.C.; FONSECA D.M.; LOPES, R.S.; JÚNIOR, D.N.; CECON, P.R.; QUEIROZ, D.S.; PEREIRA, D.H.; REIS, S.T. Análise de crescimento do capim elefante 'napier' adubado e irrigado. **Revista Ciência Agrotécnica**, v.29, p.415-423, 2005.

ANDRADE, A.C.; FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A. Produtividade e valor nutritivo do capim-elefante cv.Napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.29, p.1589-2000, 2000.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR DE FERTILIZANTES 1987-2007, São Paulo, ANDA, 2008. 155 p.

ARAÚJO, E. S. **Validação do modelo NUTMON para o diagnóstico do manejo agrícola: Estudo em duas propriedades familiares do Rio de Janeiro**. 2008. 99f Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamentos de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2008

ARAUJO, 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**, v.44, p.769-776, 2009.

ARAUJO, E.S.; GUERRA, J.G.M.; ESPINDOLA, J.A.A.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; MARTELLETO, L.A.P.; ALVES, B.J.R. Recuperação no sistema solo-planta de nitrogênio derivado da adubação verde aplicada à cultura do repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.729-735, 2011.

ARNOLD S.L. and SCHEPERS J.S. A simple roller-mill grinding procedure for plant and soil samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.537-545, 2004

BAGGS E.M.; CHEBII J.K.; 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**, v.90, p.69-76, 2006.

BAGGS E.M.; RICHTER M.; CADISCH G.; HARTWIG U.A. Denitrification in grass swards is increased under elevated atmospheric CO₂. **Soil Biology and Biochemistry**, v.35, p.729-732, 2003.

BAGGS, E.M.; REES R.M.; SMITH K.A.; VINTEN J.A. Nitrous legume oxide emission from soils after incorporating crop residues. **Soil Use Manage**, v.16, p.82-87, 2000.

BALL, B.C.; SCOTT, A.; PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil and Tillage Research**, v.53, p.29-39, 1999.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeitos de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.599-607, 2000.

BERNARDINO, F.S.; GARCIA, R.; ROCHA, F.C. Produção e características do efluente e composição bromatológica da silagem de capim-elefante contendo diferentes níveis de casca de café. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.2185-2291, 2005.

BODDEY, R.M.; SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Bio-ethanol production in Brazil. Chapter 13. In PIMENTEL, D. **Renewable Energy Systems: Environmental And Energetic Issue**, Springer, New York. In press. 505p. 2008.

BODDEY R.M.; POLIDORO J.C.; RESENDE A.S.; ALVES B.J.R.; URQUIAGA S. Use of the ^{15}N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N_2 fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.28, n.889–895, 2001.

BODDEY, R.M.; PEOPLES, M.B.; PALMER, B.; DART, P. Use of the ^{15}N abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.57, n.235-270, 2000.

BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Quantificação da fixação biológica de nitrogênio associada as plantas utilizando o isótopo ^{15}N . In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R.S., (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: Embrapa-SPI, (Embrapa-CNPAC. Documentos, 46) p. 471-494, 1994.

BODDEY, R.M. e VICTORIA, R.L. Estimation of biological nitrogen fixation associated with *Brachiaria* and *Paspalum* grasses using ^{15}N -labelled organic matter and fertilizer. **Plant and Soil**, Dordrecht, n.90, p.265-292, 1986.

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

BORGES, O.P.J.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J.S.; VOURLITIS, G.L. Estimativa de Q10 por meio do efluxo de CO_2 no solo na estação seca numa floresta tropical de transição amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, p.117-121, 2006.

BOUWMAN, A. F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.46, p.53-70, 1996.

BREMNER, J.M.; MULVANEY, R.L.; Urease activity in soils. In: BURNS, R.G., ed. **Soil Enzymes**, Londres, Academic Press, p.149-196, 1978.

BREMNER, J.M.; ROBBINS, S.G.; BLACKMER, A.M. Seasonal variability in emission of nitrous oxide from soil. **Geophysical Research Letters**, v.7, p.641–644, 1980.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v.124, p.3-22, 2005.

BYRNES, B.H. Liquid fertilizers and nitrogen solutions. In: International Fertilizer Development Center. **Fertilizer Manual**. Alabama: Kluwer Academic, cap. 2, p. 20-44, 2000.

CAMPOS, B. C. **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CANTARELLA, H.; MATTOS JÚNIOR, D.; QUAGGIO, J.A.; RIGOLIN, A.T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.67, p.215-223, 2003.

CARVALHO, A.M. **Uso de plantas condicionadoras com incorporação e sem incorporação no solo: composição química e decomposição dos resíduos vegetais; disponibilidade de fósforo e emissão de gases**. 167f. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. 2005

CARVALHO, M.M., ALVIM, M.J., XAVIER, D.F. **Capim-elefante, produção e utilização**. Coronel Pacheco: EMBRAPA/CNPGL. p.31-48. 1994.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.; VOLKOFF, B. Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. **Relatórios de Referência do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, p. 41, 2001.

CHALK, P.M. Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotation: a review. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.49, p.303–316, 1998.

CHAVEZ, L.F.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ESCOBAR, L.F.; FIORIN, J.; LA SCALA Jr., N. Emissões de Curto Prazo de CO₂ do Solo sob Sistemas de Preparo em Latossolo Vermelho do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...**, 2008. 1 CD-ROM.

CHEN, D.; LI, Y.; TURNER, D.; DENMEAD, T.; FRENEY, J. Measurement and simulation of ammonia volatilization from urea fertilizer in cropping and pasture system. **Abstracts of Nitrogen 4th Conference**, Costa do Sauípe, Bahia, Brasil, p.52, 2007.

CHITOLINA, J.C. Fertilizantes de lenta liberação de N: conceitos. Ureia coberta com enxofre. Piracicaba: ESALQ/USP, p.16, 1994.

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

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

COSTA, F.S. **Estoque de Carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro**. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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

CUNHA, M.V.; LIRA, M.A.; SANTOS, M.V.F.; FREITAS, E.V.; JUNIOR, J.C.B.D; MELLO, A.C.R.; MARTINS, K.G.R. Association between the morphological and productive characteristics in the selection of elephant grass clones. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, p. 482-488, 2011.

DAVIDSON E.A., SAVAGE K., VERCHOT L.V., NAVARRO R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, p.21-37, 2002.

DA 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.

DEL GROSSO S.J.; PARTON W.J.; MOSIER A.R.; OJIMA D.S.; KULMALA A.E.; PHONGPAN S. General model for N₂O and N₂ gas emissions from soils due to denitrification. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, p.1045–1060, 2000.

DEL PRADO, A.; MERINO, P.; ESTAVILLO, J.M.; PINTO, M.; GONZÁLEZ-MURUA, C. Nitrous and nitric oxide emissions from different N sources and under a range of soil water contents. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.74, p.229–243, 2006.

DIAS, J.D. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de florestas nativa da Amazônia**. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DICK, J.; SKIBA, U.; WILSON, J. The effect of rainfall on NO and N₂O emissions from Ugandan agroforest soils. **Phyton Annales Rei Botanicae**, v.41, p.73–80, 2001.

DOBBIE K.E.; SMITH K.A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables. **Global Change Biology**, v.13, p.204–218, 2003.

DOBBIE, K.E.; SMITH, K.A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. **European Journal of Soil Science**, v.52, p. 667-673, 2001.

DÖBEREINER, J.; DAY, J.M. Associative symbioses in tropical grasses: Characterization of microorganisms and nitrogen-fixing sites. In INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NITROGEN FIXATION. Pullman. Washington State University, **Anais...** Washington.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. Centro Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. p.212. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 312p. 2006.

ESCOBAR, L.F.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CHAVEZ, L.F.; ZANATTA, J.A.; FIORIN, J.E. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical Oxisol as influenced by summer crop residues and their management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.507-516, 2010.

ESCOBAR, L.F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do rio grande do sul** 104f. Dissertação. (Mestrado em ciência do solo) Universidade federal de Santa Mari, Santa Maria, RS. 2008.

FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M.; MISTURA, C.; SALGADO, L.T.; QUEIROZ, D.S.; MORAIS, R.V.; VITOR, C.M.T.; MOREIRA, L.M. Adubação nitrogenada e potássica em capim elefante cv. Napier sob pastejo rotativo. **Boletim da Indústria Animal**, N. Odessa, v.64, p.149-158, 2007.

FERNANDES, F.C.S. **Dinâmica do nitrogênio na Cultura do milho (*Zea mays* L.), em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema de plantio direto**. Tese (Doutorado em Solos-Nutrição de plantas) 197f - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FIRESTONE, M.K.; DAVIDSON, E.A. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soils. In: ANDREAE, M.O.; SCHIMMEL, D.S. (Org.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere**, New York, Wiley, p.7-21, 1989.

FLORES, R.A. **Produção de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para fins energéticos no cerrado: resposta a adubação nitrogenada e idade de corte**. 66p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2009.

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C.; MORAES, R. Volatilização de amônia em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1677-1684, 2010.

GOMES, J. **Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

HARRISON R.; ELLIS S.; CROSS R.; HODGSON J.H. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide associated with the decomposition of arable crop residues on a sandy loam soil in Eastern England. **Agronomie** (France), v.22, p.731–738, 2002.

HARRISON, R.; WEBB, J. A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions. **Advances in Agronomy**, v.73, p. 65–108, 2001.

HOUGHTON, J. T., Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN, AND D. XIAOSU, **Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, p.881. 2001.

INSELSBACHER, E.; WANEK, W.; RIPKA, K.; HACKL, E.; SESSITSCH, A.; STRAUSS J., ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Greenhouse gas fluxes respond to different N fertilizer types due to altered plant-soil-microbe interactions. **Plant and Soil**, v.343, p.17-35, 2011.

IPCC (International Panel on Climate Change) **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2006.

IPCC. International Panel for Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories., <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>. Cited July, 2007.

JANTÁLIA, C.P.; SANTOS, H.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. e 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.

JENSEN, E.S.; PEOPLES, M.B.; BODDEY, R.M.; GRESSHOFF, P.M.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; ALVES, B.J.R.; MORRISON, M.J. Legumes for mitigation of climate changes and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. **A review. Agronomic and Sustainable Development**, v.245, p.1-30, 2011.

JONES, C.C.; MCCONNELL, K.; COLEMAN, P.; COX, P.; FALLOON, P.; JENKINSON, D.; POWLSON, D. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of carbon in soils. **Global Change Biology**, v.11, p.114-166, 2005.

JUNK G.; SVEC H.J. The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.14, p.234-243, 1958.

KIRCHHOF, G.; ECKERT, B.; STOFFELS, M.; BALDANI, J.I.; REIS, V.M.; HARTMANN, A. *Herbaspirillum frisingense* sp. nov., a new nitrogen-fixing bacterial species that occurs in C4- fiber plants. **International Journal of System and Evolution**, v.51, p.157-168, 2001.

LA SCALA J.R., N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.91, p. 244–248, 2006.

LA SCALA JÚNIOR, N.; LOPES, A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latossol in southern Brazil. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.62, p.163-66, 2001.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ 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.

LINN D.M.; DORAN J.W. Effect of water-filled pore space on CO₂ and N₂O production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1167-1172, 1984.

LIU, X.J.; MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; ZHANG, F.S. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil. **Plant and Soil**, v.280, p.177–188, 2006.

MAJUMDAR, D.; MITRA, S. Methane consumption from ambient atmosphere by a Typic Ustochrept soil as influenced by urea and two nitrification inhibitors. **Biology and Fertility of Soils**, v.39, p. 140-145, 2004.

MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Desenvolvimento e calibração de um sistema coletor de amônia volatilizada do solo. **CD-ROM**. In: FERTBIO, 2000, Santa Maria. Resumos expandidos. Santa Maria: UFSM, 2000.

MARTHA JÚNIOR, G.B. **Produção de forragem e transformação do nitrogênio do fertilizante em pastagem irrigada de capim tanzânia**. 165f. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Piracicaba, 2003.

MATOS, T.S. **Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados granulados de liberação lenta, baseados no uso da ureia**. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

MAZZARELLA, V.N.G. Capim Elefante com Fonte de Energia no Brasil: Realidade Atual e Expectativas. 1º Seminário sobre madeira energética. **CD Rom. Disponível em <http://maden2008.inee.org.br/>** Acesso em 18/dezembro de 2008.

MAZZARELLA, V. Capim Elefante: Capim elefante produz energia. Instituto de pesquisas tecnológicas, <<http://www.ipt.br>>. Acesso em 15 de outubro/novembro de 2010.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v.83, p.37-46, 2002.

MIRANDA, C.H.B.; BODDEY, R.M. Estimation of biological nitrogen fixation associated with 11 ecotypes of *Panicum maximum* grown in nitrogen 15 labeled soil. **Agronomy Journal**, v.79, p.558-563, 1987.

MISTURA, C.; FAGUNDES, J.L.; FONSECA, L.M.; MOREIRA, C.L.M.; JÚNIOR, D.M.; JÚNIOR, J.R. Disponibilidade e qualidade do capim elefante com e sem irrigação adubado com nitrogênio e potássio na estação seca: **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p.372-379, 2006.

MORAIS, R.F.; QUESADA, D.M.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Contribution of biological nitrogen fixation to Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Plant and Soil**, v.349, p.1-12, 2011.

MORAIS, R.F.; SOUZA, B.J.; LEITE, J.M.; SOARES, L.H.; ALVES, B.J.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.U. Produção, qualidade de biomassa e fixação biológica de N em genótipos de capim-elefante destinados à geração de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p.133-140. 2009.

MORAIS, R. F. **Potencial produtivo e eficiência da fixação biológica de nitrogênio de cinco genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.), para uso como fonte alternativa de energia**. 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

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

MOSIER, A.R.; HALVORSON, A.D.; REULE, C.A.; LIU, X.J.J. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado. **Journal of Environmental Quality**, v.35, p.1584–1598, 2006.

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.

MOTA, V.J.G.; REIS, S.T.; SALES, E.C.J.; JÚNIOR, V.R.R.; OLIVEIRA, F.G.; WALKER, S.F.; MARTINS, C.E.; CÓSER, A.C. Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em pastagem de capim-elefante no período seco do ano no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, p.1191-1199, 1998.

NOVOA, R. S. A., TEJEDA, H. R. Evaluation of the N₂O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.75, p. 29-46, 2006.

NUNES, P.C. **Influência do efluxo de CO₂ do solo na produção de forragem numa pastagem extensiva e num sistema agrosilvopastoril**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2003.

O'HARA, G.W.; DANIEL, R.M. Rhizobial denitrification: A review". **Soil Biology and Biochemistry**, v.17, p.1-9, 1985.

OLIVEIRA, J.R. **Perdas de solo, água e nutrientes em um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes padrões de chuva simulada**. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

OLIVEIRA, W.R. **Quantificação das emissões de N₂O resultantes de fertilizante, fixação de N₂ e resíduos de colheita em Argissolo Vermelho-Amarelo**. 40f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

OLSEN, K. Multiple Wavelength Ultraviolet Determinations of Nitrate Concentration, Method Comparisons from the Preakness Brook Monitoring Project, **Water, Air and Soil Pollution**, v.187, p.195-202, 2008.

PACIULLO, D.S.C; FERNANDES, P.B.; GOMIDE, C.A.M.; CASTRO, C.R.T.; SOBRINHO, F.S.; CARVALHO, C.A.B. The growth dynamics in *Brachiaria* species according to nitrogen dose and shade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, p.270-276. 2011.

PARKIN T. B., KASPAR T.C. Nitrous oxide emissions from corn–soybean systems in the midwest. **Journal of Environmental Quality**, v.35, p.1496 -1506, 2006.

PASSIANOTO, C.C.; AHRENS, T.; FEIGL, B.J.; STEUDLER, P.A.; DO CARMO, J.B.; MELILLO, J.M. Emissions of CO₂, N₂O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil. **Biology and Fertility of Soils**, v.38, p.200–208, 2003.

PENG, Q.; QI, Y.; DONG, Y.; XIAO, X.; HE, Y. Soil nitrous oxide emissions from a typical semiarid temperate steppe in inner Mongolia: effects of mineral nitrogen fertilizer levels and forms. **Plant and Soil**, v.342, p.345-357, 2011.

PEOPLES M.B., FAIZAH A.W., RERKASEM B. e HERRIDGE D.F. **Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field**. ACIAR, Monograph No. 11, Canberra, 76p. 1989.

PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J.G.M.; CECON, P.R. Efeito residual da adubação verde no rendimento de brócolis (*Brassica oleraceae* L. var. Italica) cultivado em sucessão ao milho (*Zea mays* L.). **Ciência Rural**, v.34, p.1739-1745, 2004.

PES, L.Z. **Fluxo de Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Preparo do Solo e Rotação de Culturas no Planalto do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2009.

QUEIROZ FILHO, J.L.; SILVA, D.S.; NASCIMENTO, I.S. Produção de matéria seca de cultivares e qualidade de cultivares de capim elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.27, p.262-266, 1998.

QUESADA D.M. **Parâmetros quantitativos e qualitativos da biomassa de genótipos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) com potencial para uso energético, na forma de carvão vegetal.** 84f. Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2005.

QUESADA D.M. **Seleção de genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para a alta produção de biomassa e eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN).** 86f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2001.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v.89, p. 100-106, 2005.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1609-1623, 2007.

REIS V.M.; REIS, F.B.; QUESADA D.M.; OLIVEIRA O.C.A.; ALVES B.J.R.; URQUIAGA S.; BODDEY R.M. Biological nitrogen fixation associated with tropical pasture grasses. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.28 , p.837–844, 2001.

ROBERTSON, G.P.; GRACE, P.R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials. **Environment, Development and Sustainability**, v.6, p.51–63, 2004.

ROCHETTE, P.; JANZEN, H.H. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.73, p.171-179, 2005.

RODRIGUES, J. E. L. F.; ALVES, R. N. B.; LOPES, D. M. N.; TEIXEIRA, R. N. G.; ROSA, E. S. **A Importância do feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC.) como cultura intercalar em rotação com milho e feijão caupi em cultivo de coqueirais no Município de Ponta-de-Pedras/Marajó-PA.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 4 p. (Embrapa Amazônia Oriental. **Comunicado Técnico**, 96). 2004.

RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J.C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p.263–274, 2006.

RUSSOW, R.; SPOTT, O.; STANGE, C. F. Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N₂O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on ¹⁵N field experiments, **Soil Biology e Biochemistry**, v.40, p.380–391, 2008.

SAMSON, R; MANI, S; BODDEY, R; SOKHANSANJ, S; QUESADA, D; URQUIAGA, S; REIS, V; HO LEM, C. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. **Critical Reviews In Plant Sciences**, v.24, p.1-35; 2005.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH V. A. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. In: **Ciência Rural**, v.33, p.687-692, 2003.

SANHUEZA, E.; CÁRDENAS, L.; DONOSO, L.; SANTANA, M. Effect of plowing on CO₂, CO, CH₄, N₂O, and NO fluxes from tropical savannah soils. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 16429-16434, 1994.

SARTORI F.; LAL R.; EBINGER M.H.; PARRISH D.J. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews In Plant Sciences**, v.25, p.441-472, 2006.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verde e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.917- 926, 2000.

SHEARER, G.; KOHL, D.H. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, p.699-756, 1986.

SILVA, E.C. da; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; VELOSO, M.E. da C.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (¹⁵N) da crotalaria e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, v.36, p.739-746, 2006.

SIQUEIRA NETO, M. **Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes manejos no Cerrado goiano**. 159f. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SKIBA U.; SMITH K.A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. **Chemosphere - Global Change Science**, v.2, p.379-386, 2000.

SMITH, K.A.; THOMSON, P.E.; CLAYTON, H.; MCTAGGART, I.P.; CONEN, F. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils. **Atmospheric Environment**, v.32, p. 3301–3309, 2003.

SNYDER, C.S.; BRUULSEMA, T.W.; JENSEN, T.L. **Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management- a literature review**. p.36. Georgia, Norcross : International Plant Nutrition Institute, 2007.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. **Circular Técnica**, n.27. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

TEIXEIRA, C.M.; CARVALHO, G.J.; NETO, A.E.F.; ANDRADE, M.J.B.; MARQUES, E.L.S. Produção de biomassa e teor de macronutrientes do milheto, feijão-de-porco e guandu-ano em cultivo solteiro e consorciado. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.93-99, 2005.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. e BEATON, J.D. Soil and fertilizer nitrogen. In: TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. e BEATON, J.D., eds. **Soil fertility and fertilizers**, 4.ed. New York, Macmillan Publishing, p.112-183, 1984.

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte I: Estabilidade química da mistura. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.16, p.26-29, 1997.

UNKOVICH, M. ; HERRIDGE, D F ; PEOPLES, M B ; CADISCH, G. ; BODDEY, R. M. ; ALVES, B. J. R. ; CHALK, P.M. **Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems**. 258 p. Australian Council for International Agricultural Research, Canberra, 2008.

URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. **Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe**. 110p, Porto Alegre, 2000.

VAN SOEST, P.J.; WINE, R.H. Determination of lignin and cellulose in acid detergent fiber with permanganate. **Journal Association Official Agronomy and Chemical**, v.51, p.780-785, 1968.

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

WERNECK, C.G. **Perdas por volatilização e eficiência agronômica da mistura de ureia com zeolita natural aplicada na cultura da roseira (Rosa spp.)**. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

WOODARD K.R.; PRINE G.M. Dry matter accumulation of elephant-grass, energycane, and elephantmillet in a subtropical climate. **Crop Science**, v.33, p.818-824, 1993.

XAVIER, R. P. **Adubação verde em cana-de-açúcar: influência na nutrição nitrogenada e na decomposição dos resíduos da colheita**. 94f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2002.

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

ZANETTI, J.B. **Identificação de genótipos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.) de alta produção de biomassa com qualidade para fins energéticos**. 75f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Onde????? 2010.

ZAVASCHI, E. **Volatilização de amônio e produtividade de milho em função de ureia revestida por polímeros**. 92f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, Piracicaba, SP, 2010.

8. ANEXOS

Anexo I

Tabela 1. Consumo de energia fóssil para a adubação verde realizada em pré-plantio do capim-elefante.

Operação Agrícola	Equipamento	Litros h ⁻¹	ha h ⁻¹	Litros ha ⁻¹	Mj ha ⁻¹ *	GJ ha ⁻¹
Aração	CAT D6	27,6	1,98	13,94	665,3	0,67
Gradagem	CAT D6	13	2,52	5,16	246,2	0,25
Sulcamento	MF 660	11,5	1,26	9,13	435,6	0,44
Distribuição das sementes	MF 275	3,3	0,79	4,18	199,4	0,20
Incorporação da biomassa	CAT D6	27,6	3	9,20	439,1	0,44
Total					1.985,7	1,99

Litros h⁻¹: Litros por hora; ha h⁻¹: Hectare por hora; litros ha⁻¹: Litros por hectare

*Valor calorífico para 1 litro de óleo diesel = 47,73 MJ

Anexo II.

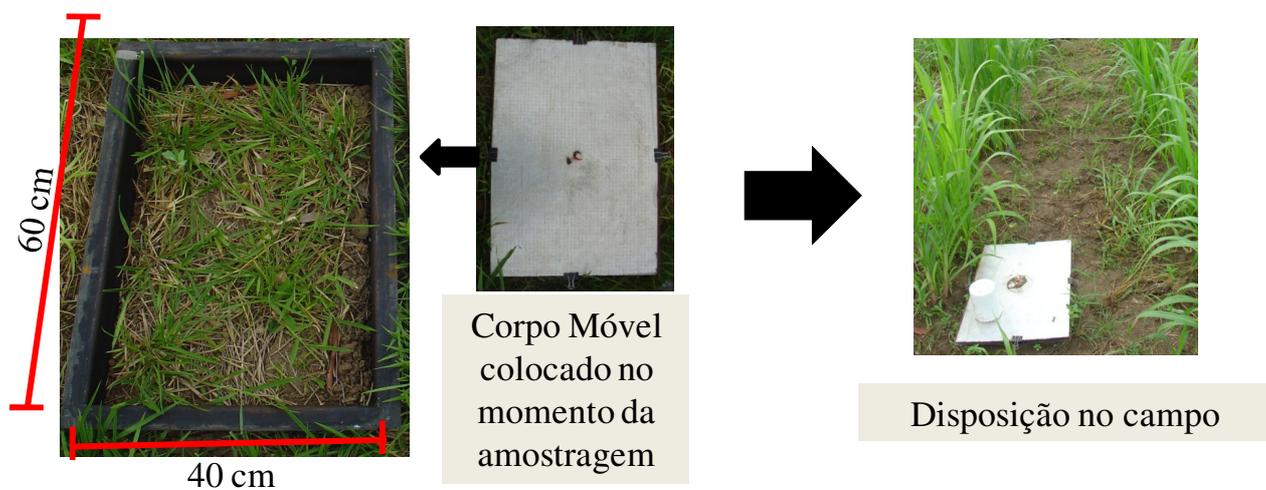


Figura 1. Esquema de base e corpo da câmara utilizada nos experimentos I, II e III.

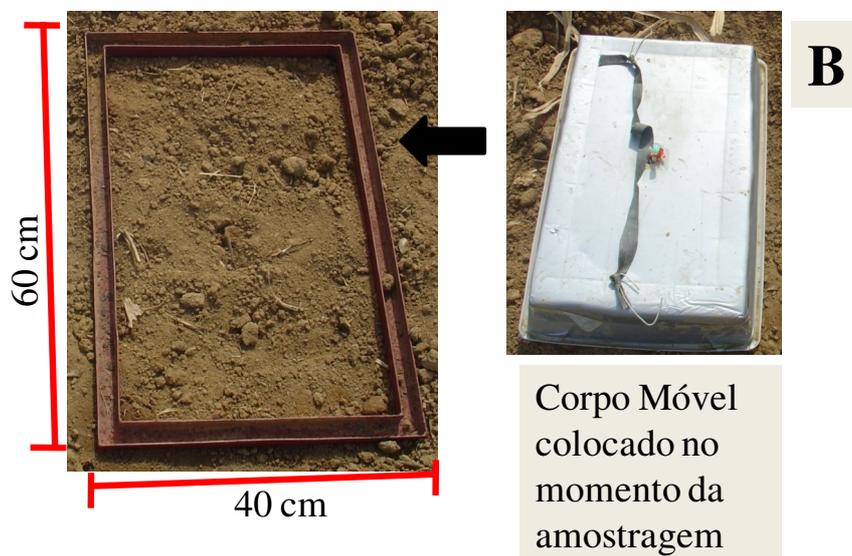
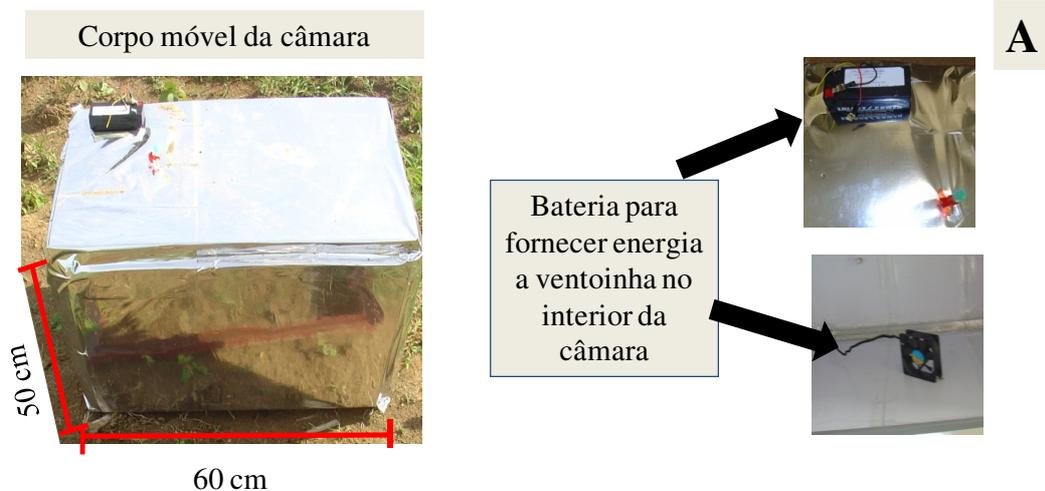


Figura 2. Esquema de base e corpo da câmara, com o uso do extensor (A) para o caso de plantas de porte mais alto, e extensor para avaliação das emissões associadas a fertilização (B).