



LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**PLANT SENSORS FOR NITROGEN MONITORING AND
FERTILIZATION IMPACTS ON THE NUTRIENT DYNAMIC
ON MAIZE CROP**

**LAVRAS – MG
2018**

LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**PLANT SENSORS FOR NITROGEN MONITORING AND
FERTILIZATION IMPACTS ON THE NUTRIENT DYNAMIC
ON MAIZE CROP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Professor Dr. Valdemar Faquin
Orientador

Dr. Álvaro Vilela de Resende
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Wilda, Luana Rafaela Maciel.

Plant sensors for nitrogen monitoring and fertilization impacts
on the nutrient dynamic on maize crop / Luana Rafaela Maciel
Wilda. - 2018.

93 p.

Orientador(a): Valdemar Faquin.

Coorientador(a): Álvaro Vilela de Resende.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Nutrição Mineral. 2. Balanço de N. 3. Lixiviação de N. I.
Faquin, Valdemar. II. Resende, Álvaro Vilela de. III. Título.

LUANA RAFAELA MACIEL WILDA

**PLANT SENSORS FOR NITROGEN MONITORING AND
FERTILIZATION IMPACTS ON THE NUTRIENT DYNAMIC
ON MAIZE CROP**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 16 de fevereiro de 2018.

Dr. Valdemar Faquin	UFLA
Dr. Álvaro Vilela de Resende	EMBRAPA MILHO E SORGO
Dra. Maria Lígia de Souza Silva	UFLA
Dr. Guilherme Lopes	UFLA
Dr. Renzo Garcia Von Pinho	UFLA
Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade	EMBRAPA MILHO E SORGO

Dr. Valdemar Faquin
Orientador

Dr. Álvaro Vilela de Resende
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

Á Deus, Jesus Cristo e todos os meus amigos espirituais!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, Jesus Cristo e toda sua falange.

A Dr. Frederick Bensons e toda sua equipe.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciência do Solo, pela minha formação profissional.

À CAPES, FAPEMIG e CNPq e Centro Universitário de Sete Lagoas pela concessão da bolsa de estudo e cessão de bolsista de iniciação científica como apoio às atividades de pesquisa durante o período do doutorado.

A Fundação CEFET Minas pela concessão de bolsa de estudos.

À Embrapa Milho e Sorgo e a todos os servidores, pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho e pelo apoio na condução dos experimentos.

Ao pesquisador Dr. Álvaro Vilela de Resende, pelos ensinamentos, paciência, orientação concedida e pelo exemplo de dedicação com o qual conduz seus trabalhos.

Ao professor Dr. Valdemar Faquin pelo apoio, orientação e aprendizado durante o curso.

Ao pesquisador Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade e toda sua equipe de trabalho, pela cessão da área experimental e apoio na condução do experimento.

À pesquisadora Dra. Cláudia Pozzi Jantalia pelo apoio na execução das análises laboratoriais.

A bolsista de iniciação científica Karen Karoline Lopes Chamon, pelo apoio, amizade e auxílio na execução das análises laboratoriais.

Aos bolsistas de iniciação científica e amigos que auxiliaram na execução deste trabalho, em especial, Gabriela, Aarón, Eduardo, Carine, Denize, Heider e José Paulo.

Aos todos os amigos e colegas do Departamento de Ciência do Solo, em especial a Laíze Aparecida Ferreira Vilela e Eduardo Lopes Cancellier pela amizade e companheirismo.

A minha querida amiga Maura Prado, pelo amor, companheirismo e amizade.

A todos os servidores do Departamento de Ciência do Solo, em especial a Dirce, pelo carinho, apoio e auxílio.

A todos os meus amigos do GOJT, pelo apoio, carinho e orações.

A minha família e todos os meus amigos, pelo apoio e torcida.

Sou imensamente grata a todos que colaboraram de alguma forma para a execução deste trabalho.

RESUMO GERAL

O nitrogênio (N) é o macronutriente de maior demanda na agricultura, cuja deficiência limita fortemente a produção das culturas. Este estudo foi composto de dois experimentos conduzidos sob irrigação, em áreas de Latossolo Vermelho, na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas – MG: 1) o primeiro tratou da efetividade de sensores no monitoramento de nitrogênio e do potencial produtivo em milho; 2) o segundo experimento focou nos efeitos de doses de N em cobertura no milho sobre a dinâmica de amônio e nitrato no solo, perdas por emissão de óxido nitroso e por lixiviação de amônio e nitrato, aproveitamento do nutriente pelas plantas, resposta em produtividade e balanço de N no cultivo em questão. No experimento 1, foram feitas leituras espectrais com sensores de N e coletadas plantas ao longo do ciclo de quatro híbridos de milho, cultivados em níveis médio e alto de investimento em adubação. Além de influenciados pelo nível de adubação, os valores das leituras dos sensores variam conforme os híbridos de milho, os estádios fenológicos e sua interação. Os sensores mostraram baixa capacidade preditiva do status nutricional de nitrogênio do milho nos ambientes estudados. Pela maior sensibilidade em detectar diferenças na intensidade de crescimento e acúmulo de biomassa, o GreenSeeker é mais efetivo na predição do potencial produtivo do milho. No experimento 2, um híbrido de milho foi cultivado em área com lisímetros de drenagem, recebendo tratamentos com 60, 150 e 396 kg ha⁻¹ de N em cobertura. Câmaras estáticas foram utilizadas para coleta das emissões de óxido nitroso após a adubação de cobertura. Ao longo do ciclo, foram realizadas coletas de solo até 60 cm de profundidade para quantificação dos estoques de amônio e nitrato, enquanto a lixiviação desses íons foi determinada em amostras de solução do solo percolada nos lisímetros. Amostras de plantas foram feitas em vários estádios fenológicos para avaliar a absorção e acúmulo de N na massa seca do milho, além da produtividade ao final do ciclo. A partir das variáveis medidas, estimou-se o balanço de créditos e perdas de N naquele cultivo. As doses de N em cobertura não resultaram em diferenças significativas no seu acúmulo pelo milho e na produtividade de grãos. As perdas de N do sistema foram maiores com o aumento nas doses do nutriente em cobertura, mas as diferenças não se mostraram proporcionais à variação na quantidade fornecida. Na estimativa do balanço de N com a menor dose em cobertura, 40% dos créditos do nutriente no sistema foram exportados nos grãos colhidos, 6% corresponderam a perdas por volatilização e lixiviação, 49% ficaram como estoque residual e 0,2% restaram como N não detectado. Excedentes de N na adubação devem ser evitados em ambiente com expressivo potencial de crédito de disponibilidade de cultivos antecessores, pois o sistema apresenta limitada capacidade de estocagem do nutriente, predispondo a perdas que reduzem a eficiência de uso do fertilizante e podem levar a prejuízos econômico e ambiental.

Palavras-chave: Sensor de dossel. Balanço de N. Óxido nitroso. Lixiviação de nitrato. *Zea mays*.

GENERAL ABSTRACT

Nitrogen (N) is the micronutrient most demanded in agriculture, of which deficiency strongly limits crop production. This study was comprised of two experiments conducted under irrigation, in Red Latosol areas, of Embrapa Milho e Sorgo, in Sete Lagoas, MG, Brazil. The first experiment regarded the effectiveness of nitrogen monitoring sensors and the productive potential of the corn. The second experiment focused on the effects of doses of nitrogen for corn coverage over the dynamics of ammonium and nitrate in the soil, losses by nitrous oxide emission and by ammonium and nitrate leaching, nutrient use by the plant, productivity response and N balance in the crop in question. In experiment 1, spectral readings were performed with N sensors and plants were collected along the cycle of four corn hybrids, cultivated in medium and high fertilization levels. In addition to being influenced by the fertilization levels, the sensor reading values varied according to the corn hybrids, phenological stages and their interaction. The sensors showed low prediction capacity of the nutritional status of nitrogen of the corn in the studied environments. For a greater sensitivity for detecting differences in the growth and biomass accumulation intensities, the GreenSeeker is the most effective for predicting corn productive potential. In experiment 2, a corn hybrid was cultivated in area with drainage lysimeter, receiving treatments with 60, 150 and 396 kg ha⁻¹ of N coverage. Static chambers were used for collecting nitrous oxide emissions after coverage fertilization. Along the cycle, soil samples were collected at 60 cm pf depth for quantifying ammonium and nitrate stocks, while leaching was determined in soil solution samples percolated in the lysimeters. Plant samples were collected in many phenological stages to evaluate N absorption and accumulation in the corn dry mass, and productivity at the end of the cycle. From the measures variables, the balance of N credits and losses were estimated for the crop. The doses of nitrogen coverage resulted in no significant differences in plant accumulation and grain productivity. The losses of N from the system were higher with the increase in the doses of the nutrient coverage, but the differences were disproportionate to the variation if quantity provided. In the estimate of N balance with the lower coverage dose, 40% of the nutrient credits in the system were exported in the harvested grains, 6% correspond to losses by volatilization and leaching, 49% remained as residual stock and 0.2% were non-detected N. Nitrogen surplus must be avoided during fertilization of environments with excessive potential of availability from previous crops, given that the system presents limited capacity for nutrient storage, predisposing losses that reduce the efficiency of fertilization and can lead to economic and environmental losses.

Keywords: Canopy sensor. N balance. Nitrous oxide. Nitrate leaching. *Zea mays*.

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	9
1	INTRODUÇÃO GERAL.....	10
	CAPÍTULO 2.....	18
1	INTRODUCTION.....	21
2	MATERIALS AND METHODS.....	23
3	RESULTS AND DISCUSSION.....	27
4	CONCLUSIONS.....	39
	REFERENCES.....	40
	CAPÍTULO 3.....	44
	ADUBAÇÃO DE COBERTURA E DINÂMICA DE NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ÁGUA-ATMOSFERA EM CULTIVO DE MILHO IRRIGADO.....	44
1	INTRODUÇÃO.....	47
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
2.1	Caracterização da área experimental.....	49
2.2	Disposição e aplicação dos tratamentos.....	53
2.3	Estimativa de perdas por emissão de N₂O.....	58
2.4	Quantificação de amônio e nitrato no solo.....	59
2.5	Estimativa de perdas por lixiviação de amônio e de nitrato.....	60
2.6	Determinação da absorção de N e da resposta em produtividade do milho.....	61
2.7	Estimativa do balanço de N no cultivo de milho.....	62
2.8	Análise estatística.....	63
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
3.1	Emissão de óxido nitroso (N₂O).....	64
3.2	Amônio e nitrato no solo.....	69
3.3	Nitrato e amônio lixiviados.....	73
3.4	Nitrogênio extraído pelo milho e produtividade de grãos.....	80
3.5	Estimativa do balanço de nitrogênio no cultivo de milho.....	84
4	CONCLUSÕES.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89

CAPITULO 1
INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO GERAL

Para atender à crescente demanda por alimentos há necessidade de se aumentar a produtividade das culturas. Este fato vem contribuindo para a modificação dos padrões tecnológicos dos sistemas de produção adotados pelos agricultores. Conseqüentemente, verifica-se a intensificação do uso do solo, com cultivos em sistema de plantio direto (SPD) e elevado investimento em insumos agrícolas nas lavouras. Entretanto, o grande desafio é maximizar a produtividade, minimizando custos econômicos e efeitos ambientais negativos. Nesse contexto, torna-se imprescindível o conhecimento sobre o manejo adequado do solo, mas também das plantas e da água que compõem os agrossistemas.

Grande parte da produção brasileira de grãos de milho deriva de cultivos em solos da região do Cerrado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015). Estes solos são caracterizados por serem originalmente ácidos e pobres em nutrientes. Conseqüentemente, para tornar essas áreas agricultáveis e alcançar produtividades satisfatórias de grãos, torna-se necessário elevado investimento no manejo da fertilidade do solo.

Em sistemas agrícolas de alta produtividade, o fornecimento de nitrogênio (N) é um dos fatores que mais limita o rendimento de grãos de culturas como o milho. O aumento da produtividade de qualquer espécie vegetal implica em maior demanda de nutrientes, com conseqüente exportação de parte deles nas colheitas. No cultivo do milho, a aplicação de adubos nitrogenados se destaca pelo fato de o nitrogênio ser o nutriente mais requerido.

O nitrogênio desempenha importante função nos processos bioquímicos da planta. Ele é componente de ácidos nucleicos, clorofila, proteínas, fito-hormônios e metabólitos secundários (HAWKESFORD et al., 2012). Dessa forma, o fertilizante nitrogenado deve ser aplicado de acordo com a demanda da cultura (HURTADO et al., 2009). Logo, a recomendação adequada de N, no estágio de desenvolvimento correto, é o ponto chave para otimizar o seu uso pelo milho e, por conseqüente, maximizar a produtividade, reduzindo o custo de produção e o risco de efeitos ambientais negativos.

À semelhança do que ocorre em outras regiões produtoras, nas condições edafoclimáticas do cerrado na região Central de Minas Gerais a demanda por N não pode ser suprida exclusivamente pelo solo, fazendo-se necessária a aplicação de quantidade expressiva de adubo nitrogenado quando se busca alta produtividade. Em épocas com condições climáticas favoráveis ao cultivo de milho, o requerimento de N na adubação pode superar 200

kg ha⁻¹, para expectativas de rendimento de grãos acima de 12.000 kg ha⁻¹ (RESENDE et al., 2012).

Ressalta-se que parte da produção de milho no Brasil é caracterizada como de subsistência, sem uso de tecnologias e insumo modernos (CANCELLIER, 2013). Entretanto, existem produtores com alto nível tecnológico, apresentando produtividade de grãos muito acima da média nacional (WILDA, 2014). Diante disso, as doses de nitrogênio aplicadas são variáveis conforme as características de cada lavoura.

Dentre os fatores que contribuem para a baixa produtividade do milho, destacam-se o clima, o potencial genético e o manejo de nutrientes e pragas. O cultivo de milho em áreas irrigadas, permite incrementos na produção, sem aumentar a área cultivada, pois ameniza um dos principais fatores de limitação da produtividade de grãos, que é a escassez hídrica (VALDERRAMA et al., 2011). A irrigação das culturas aumenta a possibilidade de obtenção de altas produtividades, entretanto, exige racionalidade técnica e econômica no uso de insumos, especialmente de adubo nitrogenado (PAVINATO et al., 2008).

Quando o fertilizante nitrogenado é adicionado no solo, parte do N é recuperado pelas plantas, mas o restante pode seguir destinos distintos, como a perda em processos de volatilização, lixiviação, desnitrificação e erosão, além de imobilização temporária por microrganismos decompositores (CANTARELLA, 2007).

Devido a essas formas de perda e à instabilidade do N nos ambientes de cultivo, o conhecimento de sua dinâmica no sistema-solo-planta-atmosfera, sob diferentes circunstâncias de manejo, é de grande importância. A dinâmica complexa e a alta variabilidade das formas nitrogenadas no solo, dificulta os estudos que abordam o uso dos teores de N mineral do solo, sobretudo nas formas de nitrato (N-NO₃⁻) e amônio (N-NH₄⁺), como indicadores da disponibilidade do nutriente para o milho em solos tropicais, principalmente quando manejados em SPD.

A lixiviação constitui o principal processo de perda de nitrogênio do solo, especialmente na forma aniônica nitrato (SANGOI et al., 2003). Em regiões de alta precipitação e solos de textura mais arenosa, essas perdas são maiores. A lixiviação de íons nitrogenados pode provocar problemas de ordem econômica e ambiental. Além de implicar na remoção do nutriente do sistema solo-planta, o N lixiviado pode tornar-se elemento poluente de mananciais de água (OLIVEIRA; VILELA; AYARZA, 2000).

A lixiviação de N-NO₃⁻ em solos brasileiros é restringida pela existência de cargas elétricas positivas em profundidade no perfil (DYNIA, 2000). Há adsorção de nitrato em maior intensidade em solos ricos em óxidos de ferro e alumínio na região tropical, o que vem

a retardar a movimentação desse ânion no perfil do solo (OLIVEIRA; VILELA; AYARZA, 2000). Entretanto, verifica-se que os Latossolos podem apresentar lixiviação de nitrato. Dynia (2000) relata que, mesmo em solos com predominância de cargas positivas e com alto teor de argila, o nitrato tem capacidade de se movimentar além da zona de exploração radicular da maioria das culturas, alcançando profundidades entre 2 e 6 m, acumulando-se nesta zona subjacente. Nesse contexto, Andrade e Alvarenga (2000) têm indicado o uso de experimentos com lisímetros de drenagem para esse tipo de monitoramento, sendo este aparato adequado para estudos de percolação de água e nutrientes no perfil do solo em áreas agrícolas.

A volatilização é outro processo de perda de N nos sistemas agrícolas. Neste caso, as formas voláteis são: NH_3 , N_2 , NO e N_2O . Alguns gases nitrogenados contribuem para o agravamento do efeito estufa, sendo a agricultura um dos principais setores que contribuem para as emissões (BUSTAMANTE, et al., 2012). Na América Latina, o Brasil é o maior emissor de N_2O (BUSTAMANTE et al., 2014) e a principal fonte são os solos agrícolas (MCTI, 2014).

Dentre os gases de efeito estufa associados à atividade agropecuária, o N_2O tem grande importância, já que 70% das emissões totais globais provêm da dinâmica do N no solo em áreas de produção (USSIRI; LAL; JARECKI, 2013), quer pela decomposição de resíduos vegetais, ou pela reação dos fertilizantes nitrogenados. O potencial de contribuição deste gás para o aquecimento global chega a ser 310 vezes maior que o efeito do dióxido de carbono (BRASIL, 2010; BROTO et al., 2010).

No solo, a volatilização de N_2O ocorre em consequência dos processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação, a partir do nitrogênio mineral (BUTTERBACH-BAHL et al., 2004). O óxido nitroso pode ser produzido durante a desnitrificação, quando bactérias anaeróbicas facultativas utilizam o nitrato comoceptor final de elétrons em substituição ao oxigênio no seu metabolismo. Esse processo ocorre em condições de anoxia, favorecido pela disponibilidade de carbono e pela presença de NO_3^- , sendo este proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo e da aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos (ALMEIDA et al., 2015). Fatores como época de adubação, doses e fontes de fertilizantes nitrogenados, além do método de aplicação, têm influência no processo de volatilização de N_2O em áreas agrícolas (ARROBAS et al., 2010).

Dada a importância do problema, o adequado monitoramento e quantificação do N perdido por volatilização em áreas agrícolas pode contribuir para o desenvolvimento de fatores de emissão de gases nitrogenados, além de permitir identificar as melhores estratégias de manejo para reduzir as perdas de N por essa via.

Em relação ao aproveitamento do N pelas culturas, a folha é a parte da planta que melhor reflete o seu estado nutricional, indicando se a disponibilidade do nutriente no ambiente de cultivo está adequada ou abaixo do nível requerido. As folhas respondem mais rapidamente às variações no suprimento de nutrientes no solo e em decorrência da adubação realizadas. Como ainda faltam métodos de análise de N no solo e análise de tecido foliar de rápida detecção, o diagnóstico nutricional das plantas em tempo hábil representa uma limitação ao melhor dimensionamento das adubações nitrogenadas.

Devido à facilidade de manuseio e rapidez de obtenção de dados no campo, sensores de vegetação vêm sendo estudados para o monitoramento do N na planta, no intuito de prever a resposta das culturas ao nutriente. Além de estimar a condição nutricional de N durante o ciclo do milho, a resposta espectral obtida por meio desses sensores também vem sendo avaliada para predição do potencial produtivo das lavouras. Os sensores são ferramentas promissoras para diagnosticar a necessidade ou não de adubação nitrogenada durante o ciclo da cultura, visando racionalizar o uso de fertilizantes e minimizar os riscos ambientais. Dentre os sensores pesquisados tem-se o clorofilômetro (ARGENTA; SILVA; BORTOLINI, 2001) e o sensor de dossel (POVH, 2011; MARTIN; RAUN; SOLIE, 2012; RISSINI; KAWAKAMI; GENÚ, 2015).

Clorofilômetros são medidores portáteis, que permitem obter leituras instantâneas quando colocados em contato com folhas da cultura, como é o caso do equipamento SPAD® (Soil Plant Analysis Development), que fornece um índice relativo do conteúdo de clorofila. O teor de clorofila é um indicador do nível de N na planta de milho que, por sua vez, está correlacionado com a produtividade de grãos (BLACKMER e SCHEPERS, 1995; WASKOM et al., 1996; ARGENTA; SILVA; BORTOLINI, 2001). O clorofilômetro vem sendo utilizado para monitorar o status de N em diferentes culturas, dentre elas: arroz (STALI et al., 2000), sorgo (MARQUARD e TIPTON, 1987) e milho (BLACKMER e SCHEPERS, 1995; WASKOM et al., 1996; VARVEL; SCHEPERS; FRANCIS, 1997; HURTADO et al., 2009; HURTADO et al., 2010; HURTADO et al., 2011).

Sensores de dossel de plantas, como o GreenSeeker®, permitem obter uma leitura que corresponde ao índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), sensível à biomassa verde de uma comunidade de plantas e, portanto, à quantidade de clorofila por unidade de área (PONZONI et al., 2001). O trabalho desenvolvido por Rouse, Haas e Schell (1973) foi pioneiro em utilizar o NDVI e mostrou, com base nas propriedades espectrais de refletância e transmitância das folhas, que é possível estimar a quantidade de nitrogênio presente nas culturas. O NDVI obtido por meio de sensores óticos para avaliação do estado nutricional de

N na planta vem sendo pesquisado em culturas como o milho (SOUZA et al., 2009; POVH, 2011; MARTIN; RAUN; SOLIE, 2012) e o trigo (RISSINI; KAWAKAMI; GENÚ, 2015).

Embora o potencial de aplicação agrônômica de sensores seja conhecido há algum tempo, só mais recentemente, com a disseminação das técnicas de agricultura de precisão, aumentou o interesse pela sua utilização em condições de lavouras comerciais. No Brasil, são ainda necessários ajustes para validação de seu uso.

Diante do exposto, compreende-se que a adequada detecção das demandas de N, bem como o seu monitoramento e manejo nos sistemas agrícolas, tem implicações importantes, não só no desempenho produtivo das lavouras, mas também nos aspectos econômico e ambiental. De forma geral, verifica-se a necessidade de melhor entendimento sobre a dinâmica e ciclagem de N em sistemas de produção nos ambientes tropicais, especialmente quando envolvem culturas em plantio direto e adubações intensivas visando alta produtividade. Não obstante, trabalhos que abordam o impacto da aplicação de adubos nitrogenados têm sido conduzidos de forma compartimentalizada, a maioria deles focando apenas as respostas filotécnicas.

Há necessidade de abordagens multidisciplinares frente à complexidade dos temas relacionados ao nitrogênio, de modo a se evitar resultados fragmentados que fornecem informações limitadas. Na tentativa de contribuir para a evolução do manejo da adubação nitrogenada no cultivo do milho, a integração dos dados sobre o comportamento e destino do N no sistema solo-água-planta-atmosfera se justifica, a fim de subsidiar tomadas de decisão mais eficazes para maximizar a produtividade e mitigar as perdas de N.

Nesse contexto, a partir de experimentos com níveis de adubação na cultura do milho irrigado, esta tese apresenta dois capítulos com os seguintes objetivos gerais: 1º experimento/capítulo – avaliar a efetividade de sensores de plantas no monitoramento do status nutricional de N ao longo do ciclo e na predição do potencial produtivo de diferentes híbridos de milho; 2º experimento/capítulo – estimar a volatilização de óxido nitroso, a lixiviação de nitrato e amônio, a absorção do nutriente pelas plantas e a produtividade de grãos, os estoques de N no solo, e o balanço de N no cultivo do milho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R.F. et al. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: uma revisão. **Revista Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v.8. n.2. p. 441-461, ago. 2015.
- ANDRADE, C.L.T.; ALVARENGA, R.C. Sistema para monitoramento integrado da dinâmica de água e solutos no solo - SISDINA. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 2000. 1CD-ROM.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R.F; BORTOLINI, C.G. Teor de clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 715-722, ago. 2001.
- ARROBAS, M. et al. Nitrogen-use efficiency and economic of slow-release N fertilizers applied to irrigated turfs in a Mediterranean environment. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, n. 3, p. 329-339, sept. 2010.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, n. 1, p. 56-60, jan. 1995.
- BRASIL. **Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. p.520.
- BROTO, C. A. et al. Emissão de óxido nitroso de estação de tratamento de esgoto de lodos ativados por aeração prolongada -estudo preliminar. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 618-623, mar. 2010.
- BUSTAMANTE, M. M. C. et al. Potential Impacts of Climate Change on Biogeochemical Functioning of Cerrado Ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 655-671, jan. 2012.
- BUSTAMANTE, M. M. et al. Innovations for a sustainable future: rising to the challenge of nitrogen greenhouse gas management in Latin America. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Netherlands, v. 9, n.1, p. 73-81, jan. 2014.
- BUTTERBACH-BAHL, K. et al. Quantifying the regional source strength of N-trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based models. **Plant and Soil**, The Hague, v. 260, n. 1-2, p.311-329, mar. 2004.
- CANCELLIER, E. L. **Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013. 75p.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 375-470.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Séries históricas relativas às safras. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/contéudos.php>>. Acesso em: abril de 2015.

DYNIA, J. F. Nitrate retention and leaching in variable change soils of a watershed in São Paulo State, Brazil. **Communications Soil Science in Plant Analysis**, New York, v. 31. N. 5-6, p. 777-791, jan. 2000.

HAWKESFORD, M. et al. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. San Diego: Elsevier, 2012. p. 135 -190.

HURTADO, S. M. C. et al. Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 300-309, mar. 2009.

HURTADO, S.M.C. et al. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 688-697, ago. 2010.

HURTADO, S. M. C. et al. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, abr. 2011.

MARQUARD, R.D.; TIPTON, J. L. Relationship between extractable chlorophyll and an in situ method to estimate leaf greenness. **Hort Science**, Alexandria, v. 22, n. 6, p. 1327-1333, mar. 1987.

MARTIN, K.L.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, Oklahoma, v. 35, n. 9, p. 1429-1439, jun, 2012.

Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI), 2014. Estimativas anuais de emissão de gases de efeito estufa no Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/updblob/0235/235580.pdf>>. Acesso em: 02 de março de 2016.

OLIVEIRA, J. R. A.; VILELA, L.; AYARZA, M. A. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.6, p.1199-1205, jan. 2000.

PAVINATO, P. S. et al. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.358-364, abr. 2008.

POVH, F. P. **Gestão da adubação nitrogenada em milho utilizando sensoriamento remoto**. 2011. 108p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

RESENDE, A. V. et al. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2012. (Circular Técnica, 181).

RISSINI, A. L.L.; KAWAKAMI, J. GENÚ, A.M. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e Produtividade de Cultivares de Trigo Submetida a Doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n.1. p. 1703-1713, abr. 2015.

ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Symposium, **NASA Special Publication**, v. 351, n.1, p. 309, jan.1973.

SANGOI, L. et al. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p.65-70, mar. 2003.

SOUZA, E.G. et al. Índices de vegetação no milho em função da hora do dia e da taxa de nitrogênio aplicada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n.1. p. 865-872, jan. 2009.

STALIN, P. et al. Comparing management techniques to optimize fertilizer N application in rice in the Cauvery Delta of Tamil Nadu India. **International Rice Research Institute**, Makati, v. 25, n. 2, p. 25-26, fev. 2000.

USSIRI, D. A. N.; LAL, R.; JARECKI, M. K. The role of nitrous oxide on climate change. In: **Soil Emission of nitrous oxide and its mitigation**. Spring, Dordrecht, 2013. p.1-28.
VALDERRAMA, M. et al. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiás. v. 41, n.2, p. 254-263, jun. 2011.

VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 4, p. 1233-1239, jan. 1997.

WASKOM, R. M. et al. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 27, n.1, p.545-560, 1996.

WILDA, R. L. M. Amostragem georreferenciada e aplicação à taxa variável de corretivos e fertilizantes: dinâmica da fertilidade do solo em lavoura de grãos do cerrado. 2014. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

CAPÍTULO 2

**EFFECTIVENESS OF SENSORS FOR NITROGEN AND PRODUCTION
POTENTIAL MONITORING IN HIGH-TECHNOLOGY MAIZE**

RESUMO

O monitoramento de lavouras por meio de sensores espectrais é uma opção buscada para prever a condição nutricional e o potencial produtivo do milho, de modo a melhor dimensionar a adubação nitrogenada. O objetivo deste trabalho foi verificar a efetividade do clorofilômetro SPAD[®] e do sensor de dossel GreenSeeker[®] na predição do estado nutricional de nitrogênio e do potencial produtivo para diferentes híbridos de milho, em ambientes de médio a alto investimento em adubação. O experimento foi conduzido na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas – MG, Brasil. Foram estudados os híbridos de milho AG8088 PROX, DKB 310 PRO 2, DKB 390 PRO e P30F53 YH. Em diferentes estádios fenológicos ao longo do ciclo da cultura, foram tomadas leituras com os sensores e realizadas amostragens de plantas para obtenção do teor de nitrogênio foliar, acúmulo de nitrogênio na planta, massa seca das folhas e massa seca total. Essas variáveis foram correlacionadas para aferir a sensibilidade dos sensores. Além de influenciados pelo nível de adubação, os valores das leituras do clorofilômetro e do sensor de dossel variam conforme os híbridos de milho, os estádios fenológicos e sua interação. As leituras dos sensores apresentam baixa correlação com o teor foliar de nitrogênio, sobretudo nos estádios iniciais do desenvolvimento do milho. Os dois sensores mostraram baixa capacidade preditiva do status nutricional de nitrogênio do milho nos ambientes estudados. As leituras do sensor de dossel são mais fortemente correlacionadas com a produção de massa seca de folhas e total das plantas. Pela maior sensibilidade em detectar diferenças na intensidade de crescimento e acúmulo de biomassa, esse sensor é mais efetivo na predição do potencial produtivo do milho.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada. Clorofilômetro. Sensor de dossel. NDVI. *Zea mays* L.

ABSTRACT

The monitoring of crops using spectral sensors seeks to predict the nutritional status and the production potential of maize in order to better determine the doses for nitrogen fertilization. The objective of this work was to assess the effectiveness of the SPAD[®] chlorophyll meter and the GreenSeeker[®] canopy sensor in predicting nitrogen nutritional status and production potential for different maize hybrids in environments with medium to high investments in fertilization. The experiment was conducted at Embrapa Maize and Sorghum in Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. The maize hybrids AG8088 PROX, DKB 310 PRO 2, DKB 390 PRO and P30F53 YH were studied. At different phenological stages throughout the crop cycle, sensor readings were taken, and plant samples were collected to determine the leaf nitrogen content, plant nitrogen accumulation, leaf dry mass and total dry mass. These variables were correlated to measure the sensitivity of the sensors. In addition to being influenced by the level of fertilization, the chlorophyll meter and canopy sensor readings vary according to the maize hybrids, the phenological stages and their interaction. The sensor readings present a low correlation with the nitrogen content, especially in the initial stages of maize development. The two sensors showed a low predictive capacity of the nitrogen nutritional status of maize in the studied environments. The canopy sensor readings are more strongly correlated with leaf dry mass and total dry mass of the plant. Due to the greater sensitivity in detecting differences in growth intensity and biomass accumulation, this sensor is more effective at predicting maize production potential.

Key words: Nitrogen fertilization. Chlorophyll meter. Canopy sensor. NDVI. *Zea mays* L.

1 INTRODUCTION

In maize (*Zea mays* L.) cultivation, nitrogen fertilization stands out because nitrogen (N) is the nutrient most required by the crop (REYES; CORREA; ZÚÑIGA, 2017), playing an important role in the biochemical processes of the plant. Therefore, insufficient N supply is one of the main limiting factors for grain yield (SILVA et al., 2014; PIAS et al., 2017). Nitrogen constitutes only 2% of maize dry matter but is considered a primary factor for grain production, along with water availability (ELAZAB et al., 2016). Proper management of N at the right development stages has been considered the key to optimizing nutrient use and therefore maximizing yield and reducing the cost of production and the risk of negative environmental effects (CAO et al., 2015).

Nitrogen fertilizer should be applied according to the crop requirements (GABRIEL et al., 2017; COLAÇO; BRAMLEY, 2018), taking into account also the nitrogen originated from soil and the decomposition of the crop residues. The availability of nitrogen in the soil can be affected by climatic, relief and management factors. Nitrogen participates in several chemical and biological processes in nature and, because of this, has different soil forms, presenting a complex dynamic that makes it difficult to evaluate its availability and to accurately determine the doses to apply to crops (HURTADO et al., 2010)

The nutritional status of the plants can indicate the need for fertilization. Monitoring can be done by sampling and analyzing the plant tissue, since the part of the plant that best reflects its nutritional status is the leaves. However, this method, although efficient, does not allow correcting nutritional deficiencies in a timely manner, which compromises the recommendation and application of nitrogen fertilizer in the appropriate phenological period of the crop (HURTADO et al., 2011; VALGAS et al., 2012).

In this sense, efforts have been made to validate the use of sensors for predicting the response of crops to N. Its use is promising due to its ease of handling, high repeatability and immediate results under field conditions such as in chlorophyll readings (SOLARI et al., 2010; CABANGON; CASTILLO; TUONG, 2011; CAO et al., 2012; HUNT et al., 2013) and canopy sensor readings (LORENZ et al., 2010; MARTIN; RAUN; SOLIE, 2012; MULLA, 2013; RISSINI; KAWAKAMI; GENUÍ, 2015; ELAZAB et al., 2016; ALI et al., 2017). These sensors can provide more agility in the decision-making process regarding management practices, allowing the detection and correction of N deficiencies during the crop cycle (LORENZ et al., 2010; LOFTON et al., 2012).

The green color of plants is strongly related to leaf chlorophyll content and N status and has been used as an indicator of N availability to plants (VALGAS et al., 2012; HUNT et al., 2013). Leaf N content, in turn, is usually correlated with grain yield (MUNÓZ-HUERTA et al., 2013). Chlorophyll meters are portable meters that allow instant readings when placed in contact with leaves of the crop; SPAD[®] (Soil Plant Analysis Development) is an example of such devices. In the monitoring of nutritional status, SPAD readings provide an indirect measurement of chlorophyll content, and its usefulness is based on the positive correlation between N content in the plant and the chlorophyll content in the leaf. Thus, the chlorophyll meter has been used to monitor nitrogen nutrition in maize (YU; WU; WANG, 2010; HURTADO et al., 2011; GABRIEL et al., 2017; REYES; CORREA; ZÚÑIGA, 2017)

Another option studied is the use of crop canopy sensors such as GreenSeeker[®]. This is an active sensor that provides a reading of the normalized difference vegetation index (NDVI) and sensitive to the green biomass of a plant community and, therefore, to the amount of chlorophyll per unit area. The NDVI obtained by optical sensors has been explored in research to evaluate the N nutritional status in maize (Scharf et al., 2011; BARKER; SAWYER, 2012; Tompson et al., 2015; Sharma et al., 2015).

Although the agronomic potential of these sensors has been known for some time, the recent spread of precision farming techniques has increased interest in using them under commercial farming conditions. In Brazil, adjustments are still needed to validate their use, including due to conditioning factors related to N dynamics and the response of plants in tropical crops. The objective of this work is to compare the SPAD chlorophyll meter and the GreenSeeker canopy sensor with regard to the effectiveness of predicting N nutritional status and the production potential during the maize cycle in hybrids cultivated under medium and high fertilization investments.

2 MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted at Embrapa Maize and Sorghum, located at 19° 28'30" S latitude, 44°15'08" W longitude at an altitude of 732 m in Sete Lagoas, state of Minas Gerais (MG), Brazil. The climate of the region is Cwa (with dry winters and hot summers), according to the Köppen classification. The average annual rainfall is 1,200 mm. The soil was classified as very clayey dystroferric Red Latosol (660 g kg⁻¹ clay) (EMBRAPA, 2013).

In 2012, the area was divided in two environments under medium or high technological investment in fertilization (PADILHA et al., 2015), and this differentiation has been maintained through different fertilization managements in each environment. In the 2014 offseason, beans were grown. In November 2014, 2 t ha⁻¹ of dolomitic limestone, 1 t ha⁻¹ of gypsum and 200 kg ha⁻¹ of a 3:1 mixture of potassium chloride and FTE BR 12 were applied by broadcasting in order to ensure greater soil fertility in that environment. The present work was conducted in the 2014/2015 summer harvest, with complementary irrigation, being managed under no-tillage system.

In each environment, the experimental design was a randomized block, split plot in time design, with four replications. The plots corresponded to four simple maize hybrids (AG 8088 PROX, DKB 310 PRO 2, DKB 390 PRO, and P30F53 YH). The subplots were the phenological stages in which sensor readings and agronomic evaluations were made throughout the cycle. The plots consisted of four rows of 6 m in length, spaced 0.5 m apart, where the two central rows with one-meter border at the ends (4 m²) were considered as the useful area. Duplicate plots were established in order to make possible the sensor readings, and the collection of plants along the cycle was used to determine the dry mass production and the evaluation of yield after physiological maturity.

Sowing was carried out using a plot seeder on December 17, 2014, with a distribution of 70,000 seeds per hectare. The seeds were treated with the insecticide Cropstar® (350 ml/100 kg of seeds) and the fertilizer Biozyme® (600 ml/100 kg of seeds) for the high investment environment, while the medium investment environment received only the insecticide. The formulation NPK 08-28-16 + 0.3% of B was applied at planting, at doses of 340 and 500 kg ha⁻¹, in the medium and high investment environments, respectively.

Top-dressing fertilizations were applied manually. In the medium investment environment, only one top-dressing fertilization was applied, with application of 90 kg ha⁻¹ of N in the form of urea when the plants had four fully expanded leaves (V4 stage). In the high investment environment, three top-dressing fertilizations were applied (90 kg ha⁻¹ of N in V4,

using urea; 70 kg ha⁻¹ of N + 70 kg ha⁻¹ of K₂O in V₅ via formulated NPK 20-00-20; and 40 kg ha⁻¹ of N + 44 kg ha⁻¹ of S in V₇ with ammonium sulfate), as well as a foliar application with a mixture of the fertilizers Biozyme[®] (2 L ha⁻¹), MAP (2.5 kg ha⁻¹) and calcium nitrate (1.5 kg ha⁻¹).

Twenty days after sowing (stage V₄), soil sampling was performed to determine the fertility conditions at depths of 0-20 and 20-40 cm, with the collection of 6 single samples per plot, 1/3 of which were in fertilizer rows and 2/3 of which were in the interrows. Laboratory analyses followed the methodologies described in Silva (2009). The mean soil fertility conditions are presented in Table 1.

Table 1 - Soil fertility attributes in environments with medium and high fertilization investments, at depths of 0-20 and 20-40 cm, 20 days after the sowing of maize. Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.

Attribute	Fertilization investment			
	Medium	High	Medium	High
	0-20 cm depth		20-40 cm depth	
Organic matter (dag kg ⁻¹)	4.1	3.9	3.3	3.3
pH in water	6.1	6.0	6.1	6.1
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0	0	0	0
H+Al (cmol _c cm ⁻³)	5.6	6.8	5.5	6.9
P Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	14	22	2.0	4.8
K ⁺ (mg dm ⁻³)	45	159	14	63
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	6.2	5.7	4.7	4.1
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1.0	1.2	0.8	0.9
Sum of bases (cmol _c dm ⁻³)	7.3	7.3	5.6	5.1
CEC (cmol _c dm ⁻³)	13	14	11	12
Base saturation (%)	57	52	50	42
Aluminum saturation (%)	0	0	0	0
S (mg dm ⁻³)	4	15	10	21
B (mg dm ⁻³)	1.1	1.8	0.9	1.3
Cu (mg dm ⁻³)	0.9	0.5	0.9	0.6
Fe (mg dm ⁻³)	28	19	31	19
Mn (mg dm ³)	54	9	33	7
Zn (mg dm ⁻³)	3.4	3.8	1.0	1.5

The nutritional status of maize hybrids throughout the vegetative phase was monitored with sensors at the V4, V5, V7, V9, V12 and VT stages, according to the phenological characterization proposed by Ritchie, Hanway e Benson. (2003), corresponding to the periods of 20, 26, 33, 40, 49 and 57 days after sowing. The Minolta portable chlorophyll meter (SPAD-502 model) and the Trimble GreenSeeker canopy sensor were used. SPAD readings were obtained with the chlorophyll meter, and NDVI readings were obtained with the GreenSeeker sensor.

According to the phenological stage, the evaluations with the SPAD chlorophyll meter were performed in the middle third of the first fully expanded leaf from the apex of the plant

(during the vegetative phase) or from the leaf below and opposite the ear (after female flowering), with a reading of each side of the leaf blade, disregarding the midrib and the margins, in a total of ten readings per plot.

At the same phenological stages, the NDVI readings were obtained with the GreenSeeker sensor positioned at 60 cm above the canopy, recording the mean value at a distance of three meters in the plant row. This procedure was performed in the two central rows of each plot.

In the stages where the SPAD and NDVI readings were recorded, as well as in stages R1 and R6 of the reproductive phase, samples were taken to determine the dry mass of leaves and of the whole plant, as well as the N content in leaves and other compartments of the shoot. For this purpose, two maize plants were periodically collected in each plot. The materials were oven dried at 65°C until reaching constant weight followed by dry mass quantification and N content analysis (SILVA, 2009). These procedures provided the data for the variables leaf N content (LN), leaf dry mass (LDM), total dry mass (TDM) of shoots and nitrogen accumulation in the plant (NAC). Where relevant, the data were converted to quantity per hectare, extrapolating the sample values to the equivalent of a population of 70,000 plants.

To evaluate the grain yield, after the physiological maturity, all the ears were harvested in the useful area of the plots destined for that purpose. The results were corrected for 13% moisture.

The data were subjected to analysis of variance, using the SISVAR statistical software (FERREIRA, 2011). For each phenological stage evaluated, the variables were subjected to combined analysis of variance in order to assess the existence of interaction between hybrids and fertilization investment environments. When pertinent, Tukey tests were performed to compare means, goodness-of-fit of regression models for variables of interest as a function of plant age, and Pearson's correlation analyses.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The SPAD and NDVI readings were significantly influenced by the isolated effect of the factors environment, hybrid and phenological stage as well as by the interaction hybrid x phenological stage. Among the hybrids evaluated, the highest SPAD reading value was found for AG 8088 PROX and the lowest for P 30F53 YH and DKB 310 PRO2. In the case of NDVI readings, this last hybrid presented a higher value than the others. Both sensors had statistically higher mean readings in the high fertilization investment environment (Table 2). Therefore, it was confirmed that the spectral response of maize plants was dependent on the hybrid used and the fertility level in the crop environment, providing evidence for the importance of the use of sensors based on local calibrations for monitoring crops.

Table 2 - Chlorophyll meter (SPAD) and GreenSeeker canopy sensor (NDVI) readings, nitrogen accumulation in the plant (NAC), total dry mass (TDM) and grain yield (YIELD) of maize as a function of hybrids and fertilization investment environments. Sete Lagoas - MG, harvest 2014/2015.

	SPAD	NDVI	LN	NAC	TDM	YIELD
			g kg ⁻¹	-----	kg ha ⁻¹	-----
Effect of hybrids (mean of environments and phenological stages)						
AG 8088 PROX	56.3a	0.721b	40.8a	116.8a	8.239a	10.783b
DKB 310 PRO 2	52.2c	0.746a	38.4b	128.1a	8.674a	13.219a
DKB 390 PRO	54.9b	0.729b	40.4a	115.4a	8.167a	10.793b
P 30F53 YH	53.0c	0.729b	40.5a	117.2a	8.250a	9.299c
Effect of fertilization environments (mean of hybrids and phenological stages)						
High Investment	55.2a	0.739a	40.8a	133.6a	8.539a	11.304a
Medium Investment	53.0b	0.723b	39.2b	105.2b	8.126b	10.743a

For the effects of hybrids or environments, means followed by the same letter in the column do not differ by Tukey's test at a 5% probability.

In the analysis of the interaction between hybrid and phenological stage, both the SPAD readings and the NDVI readings showed quadratic response models as a function of plant age (Figures 1 and 2). According to the models, the values recorded by the sensors increased until near the V9 stage. After that stage, the chlorophyll meter readings stabilized and then suffered a slightly sharper reduction compared to those of the GreenSeeker.

The fact that between the V8-V9 phenological stages there is high nutrient uptake, notably of potassium and nitrogen, to meet the needs of the maize plant (FANCELLI, 2015; SOUZA et al., 2015) explains the higher readings between V9 and V12. The continuous growth and concomitant accumulation of nutrients and mass means that the plant will have approximately 85 to 90% of its leaf area fully developed by the V12 stage (VON PINHO et al., 2009; FANCELLI, 2015). Thus, this pattern of development is consistent with the trend of decreased sensor readings at the more advanced vegetative stages (Figures 1 and 2), when the leaves function as a source of nutrients for the plant's reproductive structures.

The NDVI values for all hybrids tended to stabilize after the V9 stage. This was probably due to the saturation of the NDVI readings with the biomass increase of the plant population. A limitation observed for the use of GreenSeeker seems to be the difficulty in differentiating very dense plant canopies due to the saturation of the NDVI readings (SHARMA et al., 2015; COLAÇO; BRAMLEY, 2018). A study developed by Santos et al. (2014), shows that, as of stage V9, the amount of biomass of the hybrids favors the closing of the interrows, which contributes to the saturation of the NDVI reading.

Figure 1 - SPAD chlorophyll meter readings in leaves of maize hybrids as a function of plant age. Average of the two fertilization investment environments. Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.

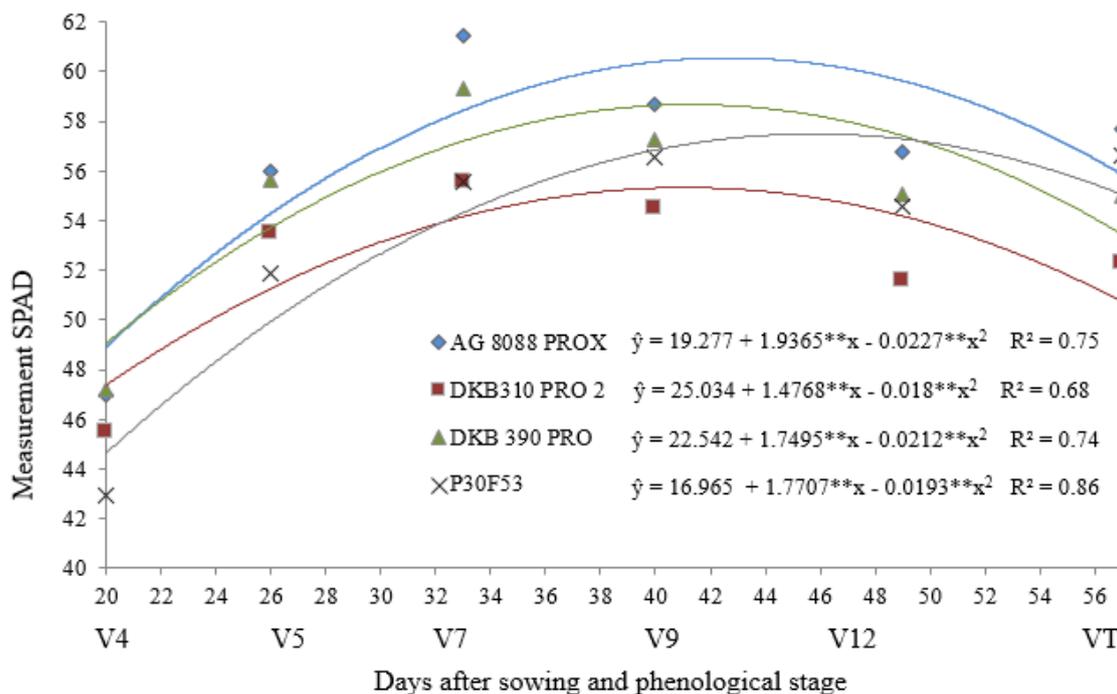
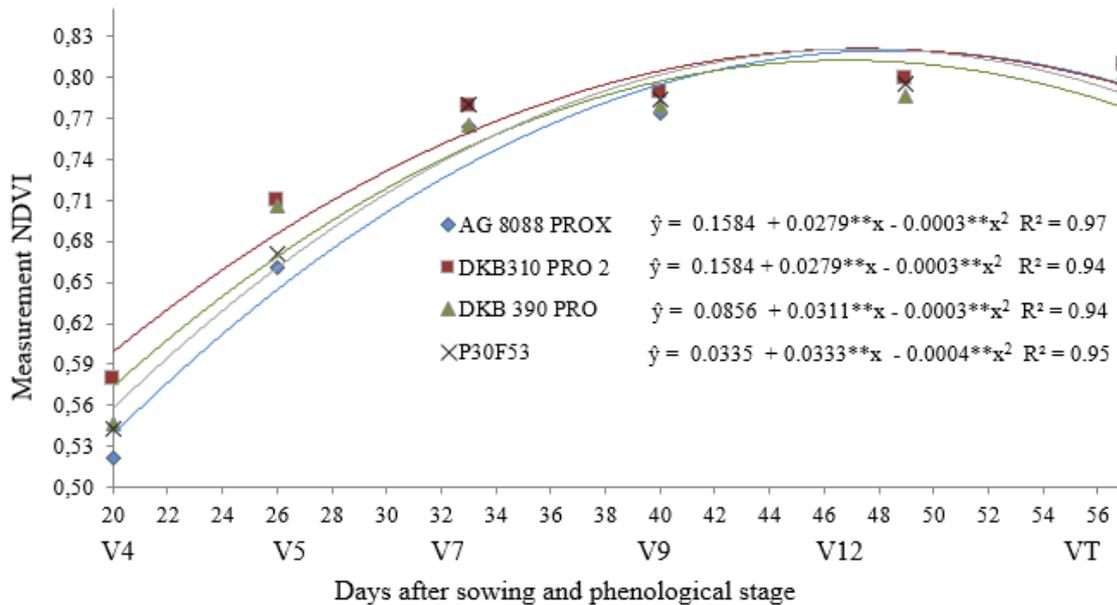


Figure 2 - NDVI readings of the GreenSeeker canopy sensor in maize hybrids as a function of plant age. Average of the two fertilization environments. Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.



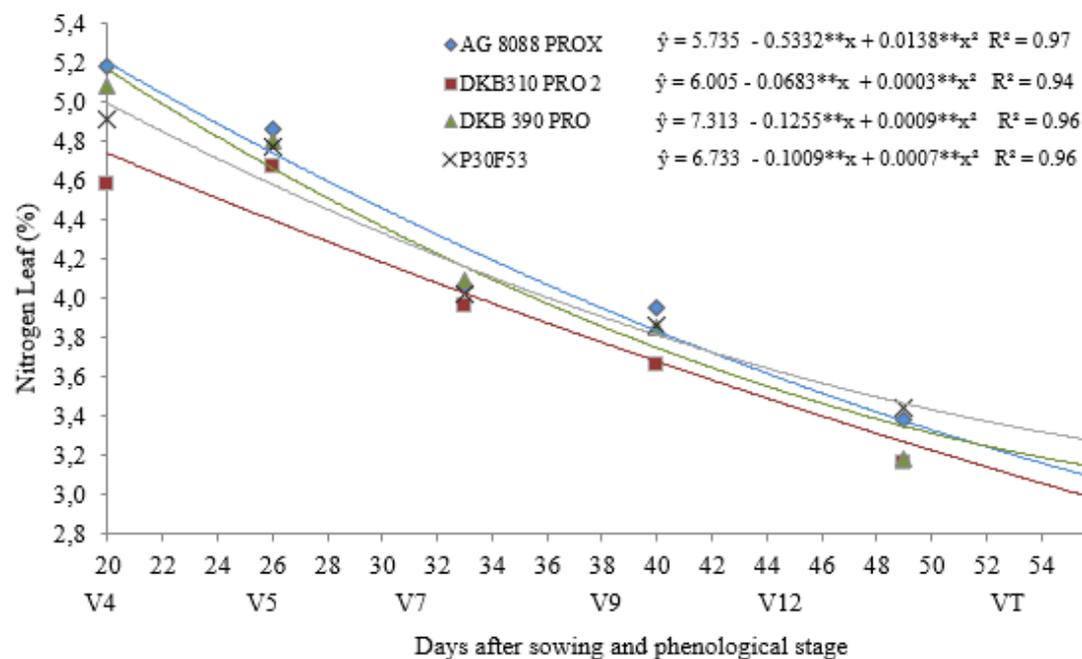
Considering the average of the two levels of fertilization investment, the highest SPAD reading values were measured at the V9 stage (40 DAS) for all the hybrids except P 30F53 YH. In increasing order, the values found in this stage were 55.2, 57.5, 58.5 and 60.4 for the hybrids DKB 310 PRO 2, P 30F53 YH, DKB 390 PRO and AG 8088 PROX, respectively. Argenta, Silva and Sangoi (2004) found that SPAD readings above 45.4, 52.1, 55.3 and 58.0 units in the V3-V4, V6-V7, V10-V11 and the silking stages, respectively, were adequate to achieve high grain yield. The observed data for all the hybrids evaluated in the present study, in the stages from V4 to V10-V11 (42 to 46 DAS), are close to the values found by those authors.

This comparison proves that the chlorophyll meter equipment used indicated normal values for well-nourished maize plants. However, it is concluded that an effective evaluation of the nutritional status requires effort to enable the comparison of data from well-nourished plants with others of the same hybrid, during a given harvest and under similar environmental and management conditions. Hence, it is important to utilize a reference plot with an abundant supply of the target nutrient, even when under cultivation conditions, and then assess whether there is sufficiency or deficiency in the rest of the area.

Although the response models exhibited the same pattern, the SPAD and NDVI readings were different for each hybrid as well as between the phenological stages during the crop cycle (Figures 1 and 2). Thus, it is confirmed that such readings are inherent to phenological stages and to maize hybrids (HURTADO et al., 2011). Together, these results demonstrate that the effect of cultivars, of forms of top-dressing N management and of monitored phenological stages are factors that make it difficult to adopt generic critical values of SPAD (VALGAS et al., 2012) and NDVI readings as indicators of nutrient sufficiency for maize crops.

There was significant interaction between hybrid and phenological stage for leaf nitrogen content (Figure 3). Data fitted to linear models indicate a decreasing pattern of LN in all hybrids as plant age increases. Reduction in N content in the leaf with advancing crop development indicates a dilution effect due to increased biomass (JARREL; BEVERLY, 1981) over the course of the cycle.

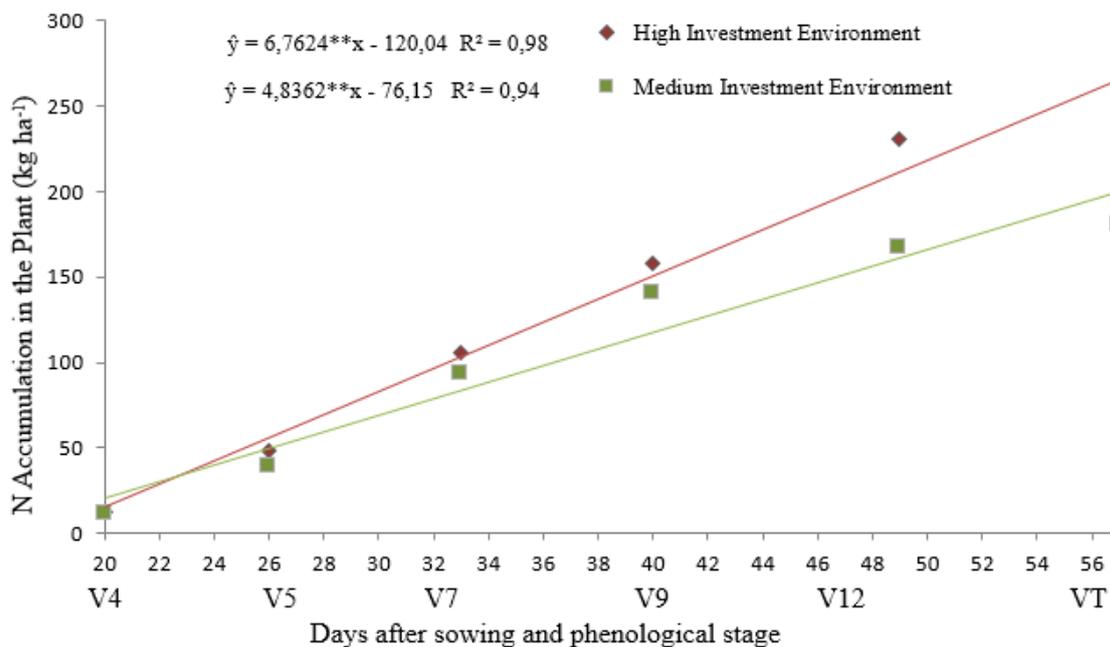
Figure 3 - Leaf N content in maize hybrids as a function of plant age. Average of the two fertilization environments. Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.



For the nitrogen accumulation in the plant, interaction between environment and phenological stage was observed, with linear increases in nutrient uptake during the cycle (Figure 4). It is interesting to note the lack of agreement between the behavior of this variable and the quadratic pattern of the regression models for the sensor readings (Figures 1 and 2).

Part of the explanation for this observation is that in soils with higher N uptake not all absorbed nutrients are converted to chlorophyll or other organic compounds, characterizing a situation of luxury consumption (VALGAS et al., 2012; BIESDORF et al., 2016; RESENDE et al., 2016; SANTIN et al., 2017). Thus, it is expected that the N not metabolized by the plant is not detected by the sensors because the amount of chlorophyll present is the main factor that influences the readings.

Figure 4 - Nitrogen accumulation by maize in medium and high fertilization environments as a function of plant age. Average of the four hybrids. Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.



Grain yield varied significantly among maize hybrids but not among the environments with different investments in fertilization (Table 2). The hybrid DKB 310 PRO 2 presented the highest yield, with a mean of 13219 kg ha⁻¹, which represented 30% more than the less productive hybrid crop. The higher potential of this cultivar was also confirmed by the higher amounts of total dry mass of the plants, although the nitrogen uptake was statistically similar to those of the other cultivars (Table 2).

In principle, the correspondence of the highest NDVI reading value in DKB 310 PRO 2 with the higher dry mass production and grain yield of this hybrid (Table 2) suggests that the GreenSeeker sensor would be effective in discriminating differences in maize production potential. Lorenz et al. (2010) report that the gains in grain yield in the crop historically have been accompanied by an increase in total biomass production.

There was no strong correlation of the sensor readings with the leaf N (LN) contents (Table 3). The explanation for this may be related to the absence of extreme differences in nitrogen availability between treatments, to the point of affecting maize metabolism more intensely, thus leading to small variations in N readings and N levels in the leaves, especially in the early stages of development. Even in the environment of medium investment in fertilization, there was a reasonable input of the nutrient (total of 117 kg ha⁻¹ of N), which could ensure the normal nutrition of the maize at the beginning of the cycle. Additionally, in both environments, the soil presented organic matter contents (Table 1) considered adequate for the Cerrado region (SOUSA; LOBATO, 2004), whose mineralization certainly contributed to plant nutrition.

Only after reaching the V9 stage, with the increase in metabolic demand of N, the plants started to present different spectral patterns, possibly expressing the response to the environment of higher fertilization (total of 240 kg ha⁻¹ of N). This led to positive and significant correlations of chlorophyll readings with LN at stages V9, V12 and VT (Table 3). This same response pattern had been detected by Valgas et al. (2012) in an experiment in Dystrophic Red Nitisol in Southern Brazil. The authors observed that the coefficients of correlation with the N contents in the tissue and with the grain yield increased for the chlorophyll meter readings obtained in more advanced stages of vegetative development. Thus, the sensor was considered accurate and efficient to monitor the N nutritional status of the maize plants after the ninth fully expanded leaf (V9).

The lack of significant correlations for GreenSeeker canopy sensor readings can be explained by the fact that this equipment does not only capture variations related to the concentration of chlorophyll or N in the leaves but also to the biomass of the plants that compose the plot. Regardless of sensor type, correlations with LN can be masked by increased biomass production by diluting the concentration in plant leaves of well-nourished plots (JARREL; BEVERLY, 1981).

The sensor readings showed some positive correlations with the accumulation of N by plants (NAC). The coefficients were significant when considering the entire set of data obtained throughout the cycle and higher in the case of the GreenSeeker (Table 3). This indicates the suitability of the canopy sensor for the monitoring of the N nutritional status for the maize crop in earlier stages, starting from V4. The apparent superior performance of the GreenSeeker may be associated with its ability to integrate the presence of chlorophyll to the biomass production or vigor of the plants, resulting in the NDVI, since the accumulation of N

at a given moment is conditioned by the levels in the tissues weighted by the biomass accumulated until then.

In the comparison of the two sensors, the consistently higher correlation coefficients of the GreenSeeker reading for dry leaf mass (LDM) and total dry mass (TDM) reinforce the indication that this sensor is appropriate for discriminating density and vigor variations in maize plant communities, which was not observed for the chlorophyll meter (Table 3).

Table 3 - Pearson correlations of chlorophyll meter (SPAD) and GreenSeeker (NDVI) readings with nitrogen content in the leaf (LN), nitrogen accumulation in the plant (NAC), dry leaf mass (LDM) and total dry matter (TDM) at different maize phenological stages. Sete Lagoas - MG, harvest 2014/2015.

Data set	SPAD vs LN	NDVI vs LN	SPAD vs NAC	NDVI vs NAC	SPAD vs LDM	NDVI vs LDM	SPAD vs. TDM	NDVI vs TDM
All data (n = 192)	-0.42 ^{ns}	-0.84 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.84*	0.53*	0.88*	0.36 ^{ns}	0.74*
V4 Stage	0.47 ^{ns}	-0.58 ^{ns}	0.58 ^{ns}	0.41 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.75*	0.40 ^{ns}	0.75*
V5 Stage	0.59 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.68*	0.31 ^{ns}	0.68*
V7 Stage	0.27 ^{ns}	-0.58 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.40 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	0.70*	0.01 ^{ns}	0.37*
V9 Stage	0.93*	-0.46 ^{ns}	0.60 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.39 ^{ns}	0.60 ^{ns}
V12 Stage	0.69*	0.60 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.80*	-0.22 ^{ns}	0.80*	0.04 ^{ns}	0.74*
VT Stage	0.65*	-0.11 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.47 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	0.70*	-0.15 ^{ns}	0.64 ^{ns}

^{ns}Non-significant. *Significant at a 5% probability.

Based on the correlation coefficients of the SPAD and NDVI readings performed since the beginning of the cycle, with plant attributes (LN, NAC and TDM) measured at later stages, after V12, it is possible to infer the predictive capacities of the two sensors (Tables 4, 5 and 6). The correlations with leaf N (LN) contents showed that the GreenSeeker showed little sensitivity for direct measurements of nitrogen concentration in the leaves. For the chlorophyll meter, it was only more effective for readings in stages close to when the nutrient was quantified in the leaves (Table 6).

Table 4 - Pearson's correlation coefficients of chlorophyll meter (SPAD) and GreenSeeker (NDVI) readings during the maize cycle, with leaf N content (LN) at later stages of the crop (V12, VT, R1, and R6). Sete Lagoas - MG, 2014/2015 harvest.

Variable 1	Variable 2			
	LN _{V12}	LN _{VT}	LN _{R1}	LN _{R6}
SPAD Reading (V4)	0.10 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.04 ^{ns}
NDVI Reading (V4)	0.14 ^{ns}	0.32 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.28 ^{ns}
SPAD Reading (V5)	0.23*	0.09 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.05 ^{ns}
NDVI Reading (V5)	0.09 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.10 ^{ns}
SPAD Reading (V7)	0.31 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.01 ^{ns}
NDVI Reading (V7)	0.25 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.09 ^{ns}
SPAD Reading (V9)	0.56 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.43 ^{ns}
NDVI Reading (V9)	0.21 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.01 ^{ns}
SPAD Reading (V12)	0.69 ^{ns}	0.54 ^{ns}	0.54 ^{ns}	0.51 ^{ns}
NDVI Reading (V12)	0.60 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.17 ^{ns}	-0.10 ^{ns}
SPAD Reading (VT)	0.77*	0.65 ^{ns}	0.62 ^{ns}	0.62 ^{ns}
NDVI Reading (VT)	0.33 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.27 ^{ns}

^{ns} Non-significant. * Significant at a 5% probability.

Table 5 -Pearson's correlation coefficients of chlorophyll meter (SPAD) and GreenSeeker (NDVI) readings during the maize cycle with NAC at later stages of the crop (V12, VT, R1, and R6). Sete Lagoas - MG, harvest 2014/2015.

Variable 1	Variable 2			
	NAC _{V12}	NAC _{VT}	NAC _{R1}	NAC _{R6}
SPAD Reading (V4)	0.49 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.08 ^{ns}
NDVI Reading (V4)	0.71*	0.87*	0.74*	0.89*
SPAD Reading (V5)	0.36 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.02 ^{ns}	-0.70 ^{ns}
NDVI Reading (V5)	0.51 ^{ns}	0.67*	0.49 ^{ns}	0.60 ^{ns}
SPAD Reading (V7)	0.20 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.48 ^{ns}
NDVI Reading (V7)	0.40 ^{ns}	0.69*	0.68 ^{ns}	0.82*
SPAD Reading (V9)	0.24 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.22 ^{ns}	-0.36 ^{ns}
NDVI Reading (V9)	0.29 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.73*	0.42 ^{ns}
SPAD Reading (V12)	0.34 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.19 ^{ns}
NDVI Reading (V12)	0.80*	0.67 ^{ns}	0.79*	0.50 ^{ns}
SPAD Reading (VT)	0.44 ^{ns}	0.21 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.04 ^{ns}
NDVI Reading (VT)	0.60 ^{ns}	0.47 ^{ns}	0.79*	0.39 ^{ns}

^{ns} Non-significant. * Significant at a 5% probability.

Table 6 - Pearson's correlation coefficients of chlorophyll meter (SPAD) and GreenSeeker (NDVI) readings during the maize cycle with total dry matter (TDM) at later stages of the crop (V12, VT, R1, R6), and grain yield (YIELD). Sete Lagoas – MG, harvest 2014/2015.

Variable 1	Variable 2				
	TDM _{V12}	TDM _{VT}	TDM _{R1}	TDM _{R6}	YIELD
SPAD Reading (V4)	0.42 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	0.34 ^{ns}
NDVI Reading (V4)	0.71*	0.91*	0.49 ^{ns}	0.81*	0.71*
SPAD Reading (V5)	0.17 ^{ns}	-0.23 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.26 ^{ns}
NDVI Reading (V5)	0.37 ^{ns}	0.60 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.50 ^{ns}	0.51 ^{ns}
SPAD Reading (V7)	0.03 ^{ns}	-0.50 ^{ns}	-0.23 ^{ns}	-0.40 ^{ns}	-0.02 ^{ns}
NDVI Reading (V7)	0.37 ^{ns}	0.92*	0.49 ^{ns}	0.78*	0.27 ^{ns}
SPAD Reading (V9)	-0.03 ^{ns}	-0.50 ^{ns}	-0.39 ^{ns}	-0.51 ^{ns}	-0.36 ^{ns}
NDVI Reading (V9)	0.03 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.68 ^{ns}	-0.68 ^{ns}	0.35 ^{ns}
SPAD Reading (V12)	0.04 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-0.46 ^{ns}	-0.46 ^{ns}	-0.44 ^{ns}
NDVI Reading (V12)	0.74 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.61 ^{ns}	0.61 ^{ns}	0.51 ^{ns}
SPAD Reading (VT)	0.15 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	-0.39 ^{ns}	-0.39 ^{ns}	-0.50 ^{ns}
NDVI Reading VT)	0.65 ^{ns}	0.64 ^{ns}	0.78*	0.78*	0.47 ^{ns}

^{ns} Non-significant. * Significant at a 5% probability.

NDVI readings showed a more direct relationship with the nutritional status indicator NAC at later stages of the cycle, with positive correlations, some of them being significant even for monitoring performed earlier in V4 (Table 5). A similar pattern was found when GreenSeeker readings were correlated with total dry mass (TDM) production and grain yield (Table 6). On the other hand, the chlorophyll meter provided inconsistent correlations or tended to have an inverse relationship with these plant indicators.

Therefore, the performance of the two sensors was divergent for the variables considered in the present study. The greater sensitivity of the GreenSeeker to detect differences in growth intensity and biomass accumulation makes it more effective for predicting crop response in terms of dry mass production. This, in turn, influences the quantification of accumulated N and grain production potential (BENDER et al., 2013), providing stronger correlations between those variables.

The performance of the chlorophyll meter seems to be more limited to the detection of variations in N concentration, reflected in the total chlorophyll contents, which give the green color intensity to the plant and provide higher SPAD readings (VALGAS et al., 2012). This

sensor also provides better results when the readings are correlated with LN monitored at the same phenological stage (Table 3), without showing clear predictive capacity for the nutritional status of maize at future stages of development or for the final biomass and grain yield (Table 6).

Note that in the present study, the experimental treatments involved a relatively satisfactory supply of N and other nutrients due to medium to high investment in fertilization in the two environments considered. Thus, the yield values observed were not very different between the environments (Table 2), indicating that there probably should not have been considerable differences in the nutritional requirements of the hybrids studied. Under these conditions, the readings obtained with the SPAD chlorophyll meter were less effective than those of the GreenSeeker canopy sensor for predicting the production potential and the response of the hybrids to the differential fertilization.

The predictive nature of the information obtained with the two sensors could have been more evident if the treatments involved situations with strong differences in N supply, including lack of nutrient supplementation through fertilization, as usually done in studies evaluating the sensitivity of these devices for the monitoring of N status in maize crop (HURTADO et al., 2011). Nevertheless, it should be noted that in the farms most likely to adopt these new technologies, the crops are already grown in soils with improved fertility and considerable investment in fertilization, so that they are very unlikely to present drastic variations in N supply. Therefore, the effectiveness of nutritional monitoring technologies based on spectral sensors should be further studied, including also analysis of areas with good production potential and lower response to fertilization, as was the case in the present study environments.

4 CONCLUSIONS

In addition to being influenced by the level of fertilization, the chlorophyll meter and canopy sensor readings vary according to the maize hybrids, the phenological stages and their interactions.

The sensor readings present a low correlation with nitrogen content, especially in the initial stages of maize development. The two sensors showed low predictive capacity of the nitrogen nutritional status of maize in the studied environments.

The canopy sensor readings are more strongly correlated with leaf dry mass and total plant dry mass. Due to the greater sensitivity in detecting differences in growth intensity and biomass accumulation, this sensor is more effective for predicting maize production potential.

REFERENCES

- ALI, M. M. et al. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Oklahoma, v. 40, n. 12, p. 928–953, abr. 2017.
- ARGENTA, G; SILVA, P.R.F; SANGOI, L. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 32, p.1379 -1387, jan. 2004.
- BARKER, D.W; SAWYER, J. E. Using active canopy sensing to adjust nitrogen application rate in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 25, p. 926-933, jan. 2012.
- BENDER, R. R. et al. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, v.105, n. 45, p.161-170, mar. 2013.
- BIESDORF, E. M. et al. Métodos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em solo de cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Mato Grosso do Sul, v. 3, n. 21, p. 44–50, fev. 2016.
- CABANGON, R.J.; CASTILLO, E.G.; TUONG, T.P. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation. **Field Crops Research**, Madison, v. 121, n. 22, p. 136–146, jan. 2011.
- CAO, Q. et al. Quantifying spatial variability of indigenous nitrogen supply for precision nitrogen management in small scale farming. **Precision. Agricultural**, Madison, v. 13, n.55, p. 45–61. jan. 2012.
- CAO, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Minnesota, v. 112, n. 14 p. 54 - 67, mar. 2015.
- COLAÇO, A. F; BRAMLEY, R. G. V. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? **Field Crops Research**, Madison, v. 218, n. 41, p. 126–140, fev. 2018.
- ELAZAB, A; ORDÓÑEZ, R. A; SAVIN, R; SLAFER, G. A; ARAUS, J. L. Detecting interactive effects of N fertilization and heat stress on maize productivity by remote sensing techniques. **European Journal of Agronomy**, London, v. 73, p. 11-24, jan. 2016.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A Computer Statistical Analysis System. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p. 1039-1042, 2011.
- FANCELLI, A. L. Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo. **BORÉM, A.; GALVÃO, JCC; PIMENTEL, MA. Milho: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFV**, p. 50-76, 2015.
- GABRIEL, J. L. et al. Airborne and ground level sensors for monitoring nitrogen status in a maize crop. **Biosystems Engineering**, Madison, v. 160, n. 20, p. 124-133, jan. 2017.

HURTADO, S. M. C. et al. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3 p.688-697, jun. 2010.

HURTADO, S. M. C. et al. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.6 p. 1011-1017, jun. 2011.

HUNT, E. R. et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Lincoln, v. 21, n. 32, p. 103-112, Jul. 2013.

JARRELL, W. M; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in agronomy**, Newark v.34, n. 2 p.197-224, apr. 1981.

LOFTON, J. et al. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. **Sensors**, Bethesda v.12, n. 6, p.7529–7547, jun. 2012.

LORENZ, A. J. et al. Breeding maize for a bioeconomy: a literature survey examining harvest index and stover yield and their relationship to grain yield. **Crop Science**, Madison, v.50, n.12 p.1-12, feb. 2010.

MARTIN, K.L.; RAUN, W.; SOLIE, J. By-plant prediction of corn grain yield using optical sensor readings and measured plant height. **Journal of Plant Nutrition**, Oklahoma, v. 35, n. 9, p. 1429-1439, jun, 2012.

MULLA, D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, Madison, v. 114, n.22 p. 358–371, jan. 2013.

MUÑOZ-HUERTA, R. F. et al. A Review of Methods for Sensing the Nitrogen Status in Plants: Advantages, Disadvantages and Recent Advances. **Sensors**, Bethesda v. 13, p. n.10, p.823- 843, feb. 2013.

PADILHA, F. A. et al Produtividade de híbridos de milho sob dois níveis de tecnologia na Região Central de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.14, n.2, p.207-218, jan. 2015.

PIAS, O. H. C. et al. Componentes de rendimento e produtividade de híbridos de milho em função de doses de NPK e de déficit hídrico em estádios fenológicos críticos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 4, p. 423-432, jan. 2017.

RESENDE, A. V. et al. Requerimento Nutricionais do Milho para Produção de Silagem. Sete Lagoas, MG, Dezembro, 2016. **Circular Técnica 221**.

REYES, J. F; CORREA, C; ZÚÑIGA, J. Reliability of different color spaces to estimate nitrogen SPAD values in maize. **Computers and Electronics in Agriculture**, Madison, v. 143, n. 22, p. 14–22, dec. 2017.

RITCHIE, S. W; HANWAY, J. J; BENSON, G. O. Como a planta de milho se desenvolve. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.103, n.56, p.1-11, mar. 2003.

RISSINI, A. L. L; KAWAKAMI, J; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p.1703-1713, jul. 2015.

SANTIN, A. A. et al. Efeito da adubação nitrogenada e do espaçamento entre linhas sobre a silagem de milho. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba, v. 8, n.1 p. 45-52, jun. 2017.

SANTOS, J. S. et al. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.1 p.54-63, set. 2014.

SCHARF, P.C. et al. Sensor based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 13 p. 1683-1691, jan. 2011.

SILVA, G. F et al. Doses de nitrogênio e fósforo para produção econômica de milho na Chapada do Apodi, RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v.18, n. 12, p. 1247 -1254, feb. 2014.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 2009. p.273.

SHARMA, L. K. et al. Active Optical Sensors Using Red NDVI Compared to Red Edge NDVI for Prediction of Corn Grain Yield in North Dakota, U.S.A. **Sensors**, Bethesda, v. 10, n. 11, p. 27832-27853, jan. 2015.

SOLARI, F. et al. An active sensor algorithm for corn nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. **Agronomy Journal, Madison**, v. 102, n.14 p. 1090–1098, jan, 2010.

SOLOS, EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013, p.20-50.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUZA, R. et al. Leituras de Clorofila e Teores de N em fases fenológicas do milho. **Colloquium Agrariae**, Teresina, v. 11, n. 1, p. 57-63, jun. 2015.

THOMPSON, L. J. et al. Model and sensor-based recommendation approaches for in-season nitrogen management in corn. **Agronomy Journal**. Madison, v. 107, n.41, p. 2020, jan.2015.

VALGAS, V. P. et al. Os atributos nas folhas são mais eficientes que o N mineral no solo para avaliar a disponibilidade desse nutriente para o milho. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.2, p.245-255, mai. 2012.

VON PINHO, R. G. et al. Marcha de Absorção de Macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, p. 157-173, 2009.

YU, H; WU, H.-S; WANG, Z. J. Evaluation of SPAD and Dualex for in-season corn nitrogen status estimation. **Acta Agronomy**, v. 36, p. 840–847, 2010.

CAPÍTULO 3

ADUBAÇÃO DE COBERTURA E DINÂMICA DE NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ÁGUA-ATMOSFERA EM CULTIVO DE MILHO IRRIGADO

RESUMO

Devido à complexidade da dinâmica do nitrogênio (N) no sistema solo-planta-água-atmosfera, torna-se importante avançar no conhecimento sobre esse nutriente em sistemas agrícolas, a partir da integração de dados dos diversos compartimentos, a fim de gerar informações que permitam aprimorar o manejo das lavouras. O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de doses de N em cobertura sobre a dinâmica de amônio e nitrato no solo, as perdas por emissão de óxido nitroso e lixiviação de amônio e nitrato, o aproveitamento do nutriente pelas plantas, a resposta em produtividade e o balanço de N num cultivo de milho. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho muito argiloso, na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas – MG. Foi cultivado milho irrigado em área com lisímetros de drenagem instalados, recebendo tratamentos com 60, 150 e 396 kg ha⁻¹ de N em cobertura na forma de ureia. Câmaras estáticas foram utilizadas para coleta das emissões de óxido nitroso. Ao longo do ciclo, foram realizadas coletas de solo até 60 cm de profundidade para quantificação dos estoques de amônio e nitrato, enquanto a lixiviação desses íons foi determinada em amostras de solução percolada nos lisímetros. Amostragens foram feitas para avaliar o acúmulo de N na massa seca das plantas, além da produtividade de grãos. As perdas de N do sistema são maiores com o aumento nas doses do nutriente em cobertura. Aplicações a partir de 60 kg ha⁻¹ de N promovem respostas similares quanto à acumulação de N pelo milho e à produtividade de grãos. Na estimativa do balanço de N com a menor dose em cobertura (60 kg ha⁻¹ de N), 40% dos créditos do nutriente no sistema são exportados nos grãos colhidos, 6% correspondem a perdas por volatilização e lixiviação, 49% ficam como estoque residual e 0,2% restam como N não detectado. O aumento da dose na adubação tem reflexo principalmente na fração não detectada. Excedentes na adubação devem ser evitados em ambiente com expressivo potencial de crédito de disponibilidade de N, pois o sistema apresenta capacidade limitada de estocagem do nutriente.

Palavras-chave: Amônio. Nitrato. Óxido nitroso. Volatilização. Lixiviação. Balanço de N.

Zea mays.

ABSTRACT

Due to the complexity of nitrogen (N) dynamics in the soil-plant-water-atmosphere system, it is important to advance the knowledge on this nutrient for agricultural systems based on the integration the data from many compartments to generate information that allow the improvement of crop management. The objective of this work was to evaluate the effects of doses of N in top-dressing over the dynamics of ammonium and nitrate in the soil, the losses by the emission of nitrous oxide and leaching of ammonium and nitrate, nutrient use by the plants, productivity response and N balance in a corn crop. The experiment was conducted in a very clayey Red Latosol, at the Embrapa Milho e Sorgo in Sete Lagoas, MG, Brazil. Irrigated corn was cultivated in area in which drainage lysimeters were installed, receiving treatments with 60, 150 and 396 kg ha⁻¹ of N in top-dressing in the form of urea. Static chambers were used for collecting the nitrous oxide emissions. Along the cycle, soil samples were collected from 60 cm of depth for quantifying the ammonium and nitrate stocks, while the leaching of these ions was determined in solution samples percolated in the lysimeters. Samples were collected to evaluate the accumulation of N in the plants dry mass, and grain productivity. N losses in the system are greater with the increase in the dose of the nutrient in the top-dressing. Applications from 60 kg ha⁻¹ of N promote similar responses regarding N accumulation in the corn and grain productivity. For the estimation of N balance with lower doses in top-dressing (60 kg ha⁻¹ of N), 40% of the nutrient credits in the system are exported in the harvested grains, 6% correspond to losses by volatilization and leaching, 49% remained as residual stock and 0.2% were undetected N. The increase in the dose of fertilization reflects especially on the non-detected fraction. Fertilizer surplus must be avoided in environments with expressive potential for N credit availability, since the system presents limited storage capacity.

Keywords: Ammonium. Nitrate. Nitrous oxide. Volatilization. Leaching. N balance. *Zea mays*.

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas agrícolas de alta produtividade, o fornecimento de nitrogênio (N) é um dos fatores que mais limita o rendimento de grãos de culturas como o milho. Com a intensificação do uso do solo no sistema plantio direto (SPD) e o elevado investimento em insumos, torna-se importante avançar no conhecimento sobre o destino do N derivado dos fertilizantes, a partir da integração dos dados de compartimentos do N no solo, na planta, na água e na atmosfera, a fim de gerar informações que permitam aprimorar o manejo das lavouras. Nesse caso, o grande desafio é maximizar a produtividade, reduzir custos econômicos e mitigar efeitos ambientais negativos.

Aproximadamente 48% dos grãos de milho no Brasil é produzido em áreas agrícolas do Cerrado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015). A rápida expansão agrícola tem levado a alterações substanciais nos ciclos biogeoquímicos na região do Cerrado (CRUVINEL; BUSTAMANTE; KOZOVITS, 2011). Entre as modificações já observadas, decorrentes das perturbações químicas, físicas e biológicas no solo, notam-se mudanças na dinâmica do nitrogênio (BUSTAMANTE, et al., 2012), sendo a agricultura um dos principais setores que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera.

O aumento da produtividade de qualquer espécie vegetal implica em maior demanda de nutrientes, com conseqüente exportação nas colheitas. A irrigação aumenta a possibilidade de obtenção de altas produtividades, entretanto, exige racionalidade técnica e econômica no uso de insumos, especialmente de adubo nitrogenado (PAVINATO et al., 2008). Como no Brasil ainda não se comprovou a viabilidade e efetividade de métodos de rotina para análise de N no solo e não são usuais as análises de tecido de rápida detecção, o diagnóstico nutricional em tempo hábil representa uma limitação na recomendação de adubos nitrogenados. A recomendação adequada de N no estágio de desenvolvimento correto da planta é o ponto chave para otimizar o uso do nutriente pelo milho.

A disponibilidade de N no solo pode ser afetada, além da adubação, por condicionantes relacionados ao clima, ao relevo e ao manejo das lavouras, estando sujeito a processos de perda (CANTARELLA, 2007). O nutriente participa de várias reações que ocorrem no solo e, em função disso, pode se apresentar em diferentes formas orgânicas, inorgânicas e algumas gasosas, o que dificulta a avaliação da sua disponibilidade e recomendação precisa de fornecimento às culturas (HURTADO et al., 2010). A complexidade na mensuração das formas nitrogenadas e sua alta variabilidade nos ambientes tropicais

dificultam os estudos que abordam o uso dos teores de nitrato (N-NO_3^-) e amônio (N-NH_4^+) no solo como indicadores da disponibilidade de N para o milho em sistema de plantio direto no Brasil.

A lixiviação de íons nitrogenados é uma importante via de perda de N do sistema solo-planta (SANGOI et al., 2003). Assim, o monitoramento dos fluxos e da composição da água percolada no solo permite uma avaliação mais acurada dos riscos de contaminação por nitrato e amônio. Nesse sentido, os lisímetros de drenagem são aparatos indicados para estudos de percolação no perfil do solo em áreas agrícolas (ANDRADE e ALVARENGA, 2000).

A volatilização de compostos nitrogenados, em especial a emissão de óxido nitroso (N_2O) para atmosfera, é outro processo que deve ser considerado quando se busca manejo mais eficiente da adubação nitrogenada. O potencial de contribuição deste gás para o aquecimento global pode ser 310 vezes maior que o efeito do dióxido de carbono (BRASIL, 2010).

Para compensação do alto investimento, a tendência no Brasil é o uso mais intensivo das áreas em plantio direto, com incremento no número de culturas e cultivos, além da aplicação de doses mais elevadas de fertilizantes. Mas o gerenciamento racional dos sistemas de produção requer melhor entendimento dos fluxos de nutrientes tão dinâmicos como o N. Diante desse cenário, a partir de experimento de campo com níveis de adubação nitrogenada em cobertura para o milho irrigado em Latossolo Vermelho muito argiloso, o presente estudo teve como objetivos: 1) estimar a emissão de óxido nitroso após a adubação nitrogenada; 2) monitorar os estoques de N nas formas de amônio e nitrato em camadas até 60 cm de profundidade no solo; 3) quantificar a lixiviação de amônio e nitrato para fora do ambiente radicular; 4) determinar a absorção de N pelas plantas e a resposta em produtividade de grãos; e 5) estimar o balanço de N no cultivo do milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido no campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas – MG, (19°28'30" de latitude S, 44°15'08" de longitude W, e altitude de 731 m). O solo da área utilizada é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico muito argiloso (EMBRAPA, 2013). De acordo com dados de atributos pedológicos apresentados por Panoso, Ramos e Brandão (2002), há dominância da caulinita como mineral de argila e possivelmente da gibsitita como óxido (Tabela 1). O clima da região é do tipo Aw, conforme classificação de Köppen, indicando clima de savana com inverno seco e temperatura média do ar do mês mais frio acima de 18°C. A precipitação pluvial média anual é de 1.200 mm.

Tabela 1 - Atributos dos horizontes A e B do Latossolo Vermelho Distrófico, de ocorrência na fazenda experimental da Embrapa Milho e Sorgo.

Atributos	Horizonte A (0-20 cm)	Horizonte B (20-150 cm)
Argila (g kg ⁻¹)	730	750
Relação Silte/Argila	0,28	0,22
Grau de Floculação (%)	35	12
C (g kg ⁻¹)	25,0	11,0
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	12,8	7,0
ΔpH (pH KCl - pH H ₂ O)	-0,8	-0,7
Al ₂ O ₃ (%)	268	281
Al ₃ + H ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	7,7	6,4
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	99	114
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃ (relação molecular)	4,2	3,9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (Ki)	1,40	1,55
SiO ₂ /R ₂ O ₃ (Kr)	1,15	1,20

Fonte: Adaptado de Panoso et al, 2002.

O local do estudo corresponde a uma área estruturada com linhas de irrigação fixas e lisímetros de drenagem, de modo a viabilizar trabalhos de pesquisa relacionados à quantidade de água no solo e lixiviação de íons. A instalação dos lisímetros na área experimental ocorreu em 2006. O histórico de cultivo e adubações é apresentado na Tabela 2.

Em 08/01/2015, a área foi dessecada com Glifosato (Roundup WG[®], 2,5 kg ha⁻¹ de p.c.) e Carfentrazona (Aurora[®], 50 ml ha⁻¹ de p.c.) via pulverizador tratorizado. Aplicou-se o inseticida Clorpirifós (Lorsban[®], 600 ml ha⁻¹ de p.c.), realizando-se em seguida o plantio consorciado de milho com crotalária para adubação verde e cobertura do solo, em espaçamento 0,25 m entre linhas e com adubação de 50 kg ha⁻¹ de NPK 04-14-08. Após 40 dias da semeadura, a área foi roçada com picador tratorizado, promovendo a uniformização da palhada sobre o solo.

A amostragem do solo antes da implantação do presente experimento foi realizada em 24/02/2015, coletando-se solo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. As determinações analíticas foram efetuadas conforme metodologias descritas em Embrapa (2013), sendo o fósforo e potássio extraídos com a solução Mehlich 1. As condições médias de fertilidade nessa época são apresentadas na Tabela 3.

Após o corte do consórcio milho e crotalária, foram coletadas nove amostras de 0,25 m² da palhada produzida. O material foi acondicionado em sacos de papel e submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar, em temperatura de 65 °C até atingir massa constante. Posteriormente, foi pesado e moído para determinação dos teores de nutrientes conforme Silva (2009), sendo os respectivos conteúdos na palhada calculados e expressos em kg ha⁻¹ (Tabela 4).

Tabela 2 - Histórico de manejo agrícola de pesquisas conduzidos na área experimental desde o ano de 2007.

Ano/safra	Cultura manejada	Adubação de semeadura	Adubação de cobertura
2007/2008	Milho BRS 1030 e <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu	Aplicação de 600 kg ha ⁻¹ de NPK 09-16-09	1ª aplicação de 200 kg ha ⁻¹ de NPK 20-02-20 2ª aplicação de 120 kg ha ⁻¹ de ureia (45% de N)
2008/2009	Milho BRS 1030 e <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu	Aplicação de 360 kg ha ⁻¹ de NPK 08-28-16	1ª aplicação de 150 kg ha ⁻¹ de ureia (45% de N) 2ª aplicação de 100 kg ha ⁻¹ de NPK 20-02-20
2010	Milho BRS 1030 e <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu	1ª aplicação de 351 kg ha ⁻¹ de NPK 08-28-16 + Zn 2ª adubação complementar com 200 kg ha ⁻¹ de Sulfato de Magnésio	Aplicação de 300 kg ha ⁻¹ de NPK 20-00-20 Aplicação de 200 kg ha ⁻¹ de ureia (44% de N)
2010	Feijão	Aplicação de 350 kg ha ⁻¹ de NPK 08-28-16	-
2011 a 2015	Área em pousio	-	-

Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 3 - Condições de fertilidade do solo na área experimental, antes da instalação do experimento nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Sete Lagoas – MG, 2015.

Atributos	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
pH H ₂ O	5,9	5,9	5,7
H+Al (cmol dm ⁻³)	6,5	6,7	7,3
P (mg dm ⁻³)*	15,4	6,8	4,1
MO (dag kg ⁻¹)	3,9	3,5	3,3
C (%)	2,2	2,0	1,9
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0	0,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,8	3,0	2,0
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,5	0,3	0,3
SB (cmol _c dm ⁻³)	4,5	3,4	2,4
CTC (cmol _c dm ⁻³)	11,0	10,2	9,7
V (%)	41	34	25
B (mg dm ⁻³)	2,4	2,5	5,1
Cu (mg dm ⁻³)	0,2	0,2	0,1
Fe (mg dm ⁻³)	1,1	1,1	1,1
Mn (mg dm ⁻³)	28,0	30,3	30,5
Zn (mg dm ⁻³)	9,6	8,3	6,8
S (mg kg ⁻¹)	4,5	2,6	1,2

*Extrator Mehlich 1.

Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 4 - Produção de biomassa e conteúdo médio de nutrientes na massa seca da palhada de milho e crotalária, coletada na área experimental antes da implantação do experimento. Sete Lagoas – MG, 2015.

Atributos	Biomassa e Nutrientes
Peso seco (kg ha ⁻¹)	11.292,2
Matéria Seca (%)	67,2
C (kg ha ⁻¹)	4.025,0
N (kg ha ⁻¹)	300,2
P (kg ha ⁻¹)	18,7
K (kg ha ⁻¹)	235,8
Mg (kg ha ⁻¹)	29,9
S (kg ha ⁻¹)	19,1

Fonte: Do autor, 2018.

2.2. Disposição e aplicação dos tratamentos

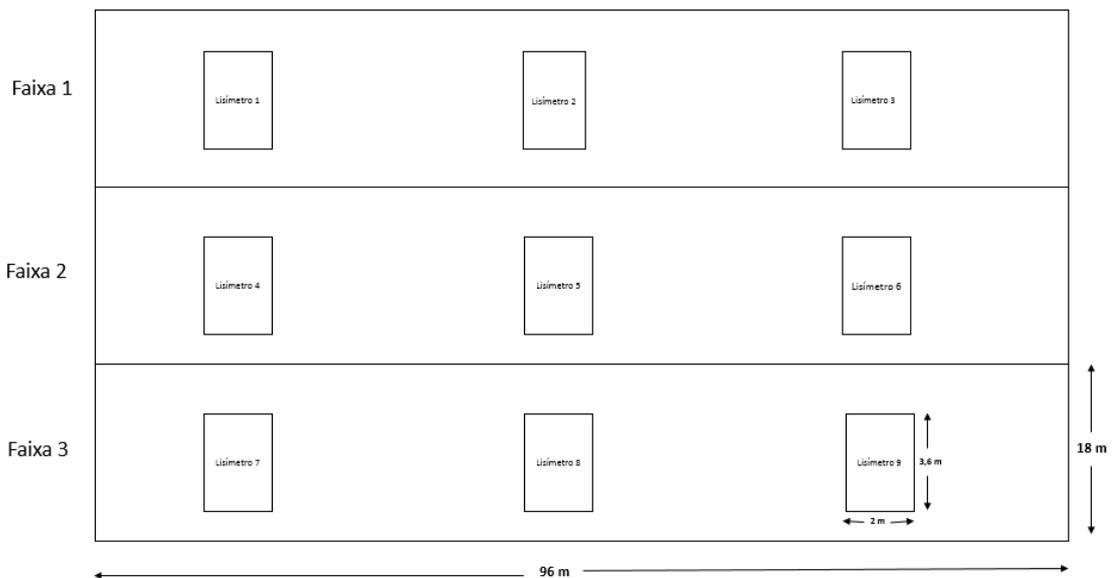
A área experimental dispõe de uma bateria de nove lisímetros de drenagem, dispositivos que permitem o monitoramento dos fluxos de água no solo (ANDRADE e ALVARENGA, 2000). Cada lisímetro de drenagem é composto de uma área para coleta da água de chuva ou de irrigação, sendo delimitado por chapas de ferro galvanizadas e revestido com uma manta de PVC, tendo a sua parte inferior em formato de moega. As bordas de chapa têm 0,3 m de altura, sendo 0,2 m enterrado na camada superficial do solo. As abas superiores da manta de PVC são coladas nas bordas de chapa. A escavação do solo para a construção do lisímetro foi feita por camadas, em função dos horizontes, e a recomposição do solo dentro do lisímetro obedeceu à mesma sequência, procurando manter sua densidade original. Um meio poroso composto por três camadas de material inerte, foi acondicionado na sua parte inferior para favorecer a drenagem.

A área experimental é então composta por três faixas de cultivo de dimensões aproximadas de 18 x 96 m, com três lisímetros dispostos no sentido do comprimento de cada faixa. Os lisímetros de drenagem apresentam as seguintes dimensões: 3,6 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,80 m de profundidade, com área superficial de 7,2 m² (Figura 1). Os lisímetros são integrados num sistema coletor localizado a jusante. Por meio deste sistema, foram coletadas as amostras de solução percolada no perfil do solo, para se quantificar a lixiviação de amônio e nitrato no decorrer do período de condução do trabalho.

Toda a área disponível em cada faixa foi semeada mecanicamente com híbrido de milho DKB 390 PRO, no dia 03/03/2015, utilizando espaçamento de 0,70 m entre linhas, buscando densidade de 65.550 plantas por hectare. A adubação de semeadura consistiu de 450 kg ha⁻¹ de adubo NPK 08-28-16 (+ Ca, S e B), correspondendo ao fornecimento de 36 kg ha⁻¹ de N no sulco. Essas mesmas operações foram realizadas manualmente na área interna dos lisímetros, para evitar que sofressem danos pelo tráfego de máquinas.

A base experimental do estudo foi estabelecida ao se variar a quantidade de N na adubação de cobertura, nas faixas contendo os lisímetros (Figura 1). As doses denominadas de N60, N150 e N396 receberam, respectivamente, 60, 150 e 396 kg ha⁻¹ de N em cobertura, conforme regulagens disponíveis no equipamento adubador manual. A cobertura foi efetuada aos 22 dias após semeadura (DAS), no estágio V4 (quatro folhas totalmente desenvolvidas), utilizando ureia comum (43% de N), distribuída em filete nas entrelinhas do milho. Imediatamente após a aplicação dos tratamentos foi realizada irrigação, com objetivo de minimizar perdas por volatilização de amônia (NH₃). Dois dias depois, foi feita uma adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (58% de K₂O), também distribuído em filete para todos os tratamentos.

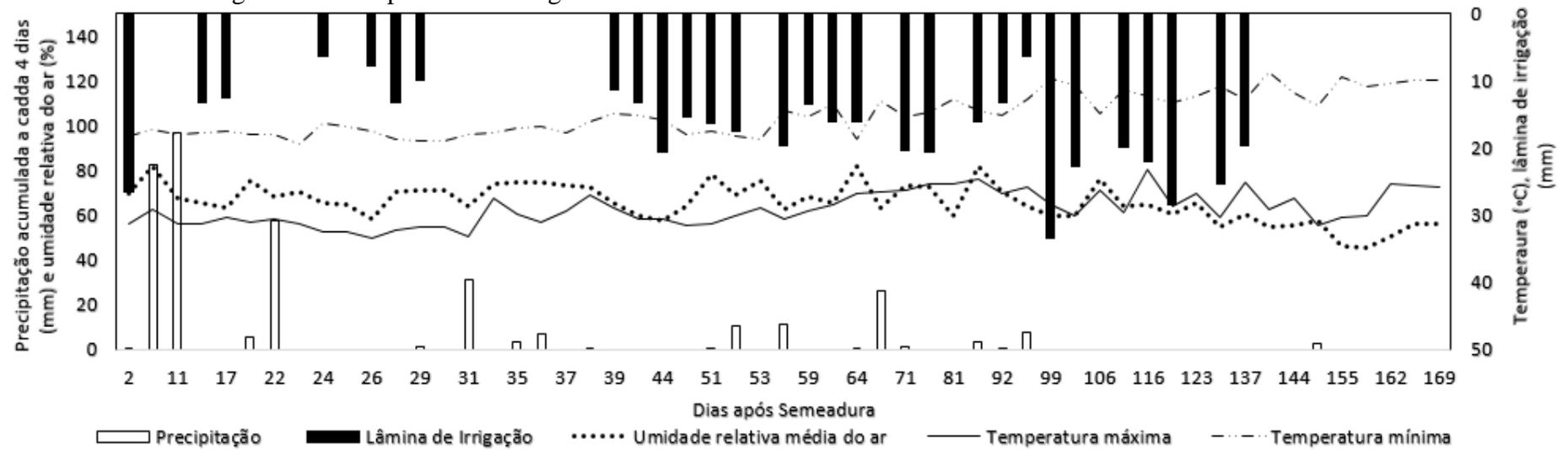
Figura 1 - Representação esquemática da área experimental, com a disposição dos lisímetros nas faixas onde foram aplicados os tratamentos com doses de N em cobertura (Faixa 1 = 60 kg ha⁻¹, Faixa 2 = 150 kg ha⁻¹, Faixa 3 = 396 kg ha⁻¹).



Fonte: Do autor, 2018.

A precipitação total acumulada durante a condução do experimento foi de aproximadamente 339 mm (Figura 2, Tabela 5), com distribuição mais abundante durante o mês de março e chuvas coincidindo com o período seguinte à semeadura do milho e também logo após a aplicação da ureia em cobertura. Empregou-se irrigação complementar com sistema de aspersão convencional fixo, dotado de aspersores setoriais escamoteáveis. As lâminas de irrigação foram monitoradas por meio de quatro coletores localizados em torno de cada lisímetro, de modo a confirmar a uniformidade do manejo de água. Ao longo do ciclo do milho, a lâmina de irrigação média total aplicada foi de 501 mm (Figura 2, Tabela 5).

Figura 2 - Condições climáticas e irrigação durante a condução do experimento. Sete Lagoas – MG, 2015. Fonte: Dados climáticos da Estação Climatológica da Embrapa Milho e Sorgo.



Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 5 - Temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e lâminas de irrigação durante os meses de condução do experimento. Sete Lagoas – MG, 2015.

Mês de observação	Temperatura (°C)			Umidade Relativa %	Precipitação (mm)	Irrigação (mm)	Precipitação e Irrigação (mm)
	Máxima	Média	Mínima				
Março	33,4	30,8	16,1	69,9	243,8	90,0	334,2
Abril	33,3	29,7	13,3	68,1	53,6	128,0	181,8
Maio	31,0	27,1	11,2	69,1	31,6	90,0	121,3
Junho	30,9	27,0	8,8	64,0	7,3	147,0	154,5
Julho	31,6	28,1	8,7	59,0	2,8	46,0	48,1
Agosto	30,4	28,7	9,5	49,6	0,0	0,0	0,0
Total	-	-	-	-	339,1	501,0	840,0

Fonte: Dados climáticos da Estação Climatológica da Embrapa Milho e Sorgo.

Durante o experimento, os tratamentos fitossanitários foram realizados quando necessário. Foram aplicados: inseticida Deltametrina (K-Othrine[®], 10 g m⁻² de p.c) no combate as formigas via polvilhadeira; inseticida Imidacloprido (200 g ha⁻¹ de p.c) para controle de cigarrinha do milho via trator pulverizador; e herbicidas Atrazina (3 litros ha⁻¹ de p.c.) e Tembotriona (200 ml ha⁻¹ de p.c.) via trator pulverizador.

2.3 Estimativa de perdas por emissão de N₂O

O fluxo de emissão de óxido nitroso (N-N₂O) foi medido utilizando a técnica de câmaras estáticas (GOMES et al., 2009; MOSIER et al. 2006), durante 12 dias após a aplicação de ureia em cobertura no milho. Três câmaras foram instaladas em torno de cada lisímetro de drenagem, totalizando 27 unidades instaladas, sendo, portanto, nove coletores para cada tratamento que recebeu N em cobertura. Além disso, numa área adjacente sem lisímetros, mantida como controle sem aplicação de N em cobertura (N0), foram instaladas outras três câmaras.

Cada câmara foi constituída por um suporte metal retangular (38 cm de largura, 58 cm de comprimento, 6 cm de altura). Esta base foi fixada no solo a 5 cm de profundidade. Sobre a base, foi acoplada uma bandeja retangular de polietileno funcionando como uma câmara. A câmara foi equipada ainda com uma camada de esponja e folha de alumínio para o isolamento térmico. O suporte metálico dispunha de uma calha que foi preenchida com borracha macia, sendo a bandeja acoplada ao suporte e fixada com elásticos, garantindo o selamento do sistema durante todo o processo de amostragem. O topo da bandeja continha uma torneira Luer com três válvulas para fixar seringas, permitindo assim a remoção dos gases no momento da amostragem. As amostras foram coletadas em seringas de polipropileno de 60 ml e imediatamente transferidas para frascos de vidro pré-evacuados (-80 kPa), fechados com selo de borracha butílica de 2 mm e selados com alumínio.

As câmaras foram instaladas nas entrelinhas de semeadura, local de deposição do adubo de cobertura, a cerca de 3 m de distância uma das outras. Amostras de gases foram coletadas imediatamente após o cerramento das câmaras (tempo zero) e depois de 15 e 30 minutos, sempre no período matutino entre as 8:00 e 10:00 horas (ALVES et al., 2012). Foi feita medição de temperatura dentro das câmaras e no solo. A análise das concentrações de N₂O nas amostras foi realizada no Laboratório de Cromatografia da Embrapa Agrobiologia,

utilizando um cromatografo a gás (Thermo Trace GC), equipado com um Porapak Q embalado por coluna e um detector de captura de elétrons.

As taxas de emissão foram determinadas a partir da integração dos fluxos de N₂O medidos em cromatografia gasosa. Na análise das amostras os padrões utilizados foram 200, 600, 1.000 e 1.500 ppb de N₂O. Os fluxos de óxido nitroso foram calculados segundo a equação 1 (ROCHETTE et al., 2004):

$$FN_2O = dC/dt (V/A) M/Vm \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: dC/dt é a alteração da concentração de N₂O na câmara durante o período de incubação, V e A são respectivamente o volume da câmara e a área do solo coberto pela câmara; M é o peso molecular de N₂O e Vm é um volume molecular da amostra.

O fluxo de N₂O foi calculado a partir da curva obtida com as concentrações de N₂O no tempo 0, 15 e 30 minutos (LIVINGSTON e HURTCHINSON, 1995), sendo calculado como $\mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e expresso em g ha^{-1} de N₂O. Utilizou-se a correção proposta por Conen e Smith (2000) para compensação do efeito da câmara sobre o N₂O. O fluxo acumulado de N₂O foi determinado pelo somatório da emissão durante os 12 dias de monitoramento. O fator de emissão de N₂O foi determinado pela diferença entre as emissões acumuladas em cada tratamento com adubação (N60, N150 e N396) e as emissões acumuladas na área sem adubação de cobertura (N0), dividido pelo total de N aplicado em cobertura naqueles tratamentos.

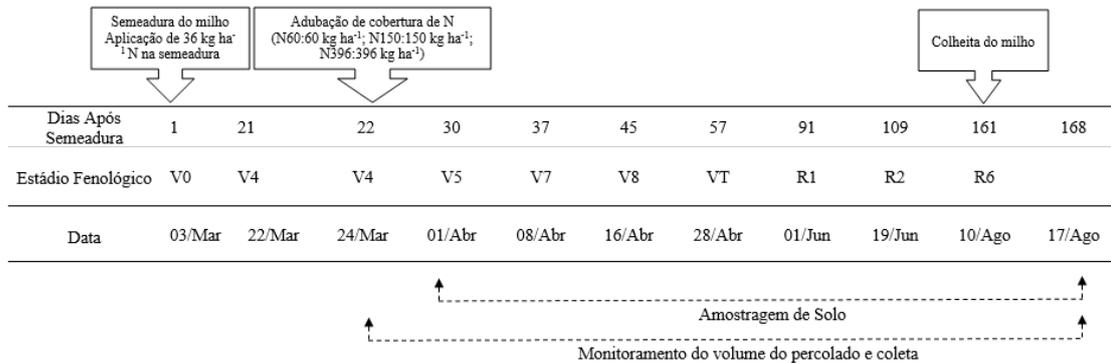
2.4 Quantificação de amônio e nitrato no solo

Para a quantificação dos teores e estoques de amônio (N-NH₄⁺) e nitrato (N-NO₃⁻) presentes no solo, foi feita amostragem utilizando trado tipo calador, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Foram realizadas nove amostragens de solo, sendo a primeira antes da semeadura e as seguintes aos 10, 17, 25, 37, 71, 89, 141, 148 dias após adubação de cobertura, correspondendo aos estádios fenológicos V5, V7, V8, VT, R1, R2, R6 e pós colheita do milho (Figura 3). Cada amostra composta foi obtida a partir de três amostras simples coletadas em torno dos lisímetros. Após as coletas, as amostras foram imediatamente congeladas até o período de análise. Para as avaliações de amônio e nitrato no solo, considerou-se, para cada ambiente (faixa com uma determinada dose de N em cobertura), o delineamento de blocos casualizados com parcelas subdivididas no tempo (amostragens ao longo do ciclo).

O monitoramento da umidade do solo foi feito nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, a partir da coleta de amostras deformadas que, posteriormente, foram secas a

temperatura de 105°C, durante 72 horas (SILVA, 2009). Também foram obtidas amostras indeformadas em anel volumétrico para determinação da densidade do solo por camada amostrada.

Figura 3 - Cronograma de amostragem de solo e de coleta de lixiviado ao longo do experimento. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

As determinações de amônio e nitrato no solo foram feitas em extrato obtido após agitação de 50 g de amostra com 150 mL de solução KCl 2 M, mais a adição de uma gota de clorofórmio e armazenamento em refrigerador com temperatura abaixo de 1°C, até o momento da quantificação (MATTOS JÚNIOR; CANTARELLA; VAN RAIJ, 1995). A quantificação dos teores de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ foi realizada pelo método de destilação do extrato por arraste de vapores semi-micro Kjeldahl (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1995) e os estoques desses íons foram calculados a partir dos seus respectivos teores no solo, considerando-se a densidade e a espessura da camada do solo, conforme a equação 2 (FERNANDES; FERNANDES, 2009):

$$E \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = p.h.N \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que: E é o estoque de N-NH₄⁺ ou de N-NO₃⁻ no solo, p é a densidade do solo, h é a espessura da camada amostrada e N o teor de amônio ou nitrato no solo.

O estoque de N mineral foi obtido pela soma dos estoques de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻.

2.5 Estimativa de perdas por lixiviação de amônio e de nitrato

Por meio do conjunto de lisímetros de drenagem, foi monitorado o fluxo de água no solo e a lixiviação dos íons amônio e nitrato. Durante o ciclo do milho, foi feito o armazenamento da água escoada de cada lisímetro em tambores plásticos, para medições

periódicas do volume percolado e coleta de amostras para quantificação da presença de amônio e nitrato (Figura 3). Esses procedimentos foram efetuados de forma mais frequente logo após a aplicação dos tratamentos de adubação de cobertura, com amostragens diárias ao longo de 21 dias (entre 1 a 22 dias após adubação de cobertura). Posteriormente, a amostragem passou a ser realizada duas vezes por semana até o final do período de monitoramento. Em cada um desses momentos, foram separadas amostras de 150 ml do percolado, adicionando-se uma gota de clorofórmio e armazenando em refrigerador com temperatura abaixo de 1 °C para posterior análise (MATTOS JÚNIOR; CANTARELLA; VAN RAIJ, 1995). No total, foram coletadas e analisadas 468 amostras de percolado.

As determinações de N-NH_4^+ e de N-NO_3^- nos percolados seguiram os mesmos protocolos para a quantificação desses íons nos extratos de solo, com destilação por arraste de vapores semi-micro Kjeldahl (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1995). As quantidades de N-NH_4^+ e N-NO_3^- lixiviadas no perfil do solo foram estimadas a partir dos seus respectivos teores no percolado, considerando-se o volume de água percolada entre as amostragens e a área de superfície do lisímetro, conforme a equação 3 (SILVA et al., 2010):

$$NP \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (N \times Vp)/A \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que: NP é a quantidade de N-NH_4^+ ou N-NO_3^- lixiviado, N é o teor de amônio ou nitrato na amostra do percolado, Vp é o volume do percolado, e A é a área do lisímetro.

Os resultados foram agrupados em decêndios, ou seja, valores acumulados a cada dez dias, ao longo do cultivo do milho. O total de amônio ou de nitrato perdidos por lixiviação correspondeu ao somatório das respectivas quantidades estimadas nas diversas amostragens realizadas durante o período monitorado. O nitrogênio mineral lixiviado foi calculado pela soma de N-NH_4^+ e N-NO_3^- .

2.6 Determinação da absorção de N e da resposta em produtividade do milho

A absorção de N pelo milho foi monitorada por meio da coleta e análise de plantas nos estádios V4, V5, V7, V8, VT, R2 e R6, de acordo com a caracterização fenológica indicada por Ritchie, Hanway e Benson (2003), correspondendo aos períodos de 2, 10, 17, 25, 37, 71 e 141 dias após adubação de cobertura. Em cada amostragem, foram cortadas duas plantas em três locais no entorno de cada lisímetro. Nos estádios V4, V5 e V7, as plantas coletadas não foram desmembradas. Em V8 e VT, foram divididas em amostras de folha e colmo, enquanto nos estádios R1 e R6 separaram-se os compartimentos folha, colmo, palha, sabugo, boneca e grãos.

Os materiais foram secos em estufa a 65°C até atingirem peso constante e seguiram para quantificação da massa seca e análise do teor de N (SILVA, 2009). A partir desses procedimentos, foram obtidos dados de teor de N na folha (NF), massa seca total da parte aérea (MST), acúmulo de nitrogênio na planta (NPLANTA) e acúmulo de nitrogênio no grão (NGRAO). O acúmulo de nitrogênio na palhada do milho (NPALHADA) foi obtido pela diferença entre NPLANTA e NGRAO. Quando pertinente, os dados foram convertidos para quantidade por hectare, extrapolando-se os valores amostrais para o equivalente a uma população de 65.550 plantas.

Após a maturação fisiológica, no dia 10 de agosto de 2015, foram colhidas as espigas em duas linhas de quatro metros de comprimento, em locais próximos dos lisímetros em cada tratamento. A produtividade de grãos foi obtida pela extrapolação da produção da área colhida (5,6 m²) para um hectare, corrigindo a umidade para 13%.

2.7 Estimativa do balanço de N no cultivo de milho

Buscando estimar o balanço de N no cultivo do milho, foram levantados indicadores dos aportes, remoções e estoques residuais do nutriente no sistema.

Entradas de N: 1) o estoque de N mineral do solo na profundidade de 0-60 cm, antes da semeadura do milho; 2) o N proveniente da ciclagem da palhada de milheto e crotalária da adubação verde antecessora, considerando taxa de mineralização de 50% durante o cultivo do milho; 3) o N oriundo da matéria orgânica do solo, com taxa de mineralização de 3% a cada safra (FONTOURA e BAYER, 2008); 4) o N aplicado na adubação de semeadura do milho; e 5) o N aplicado em cobertura.

Saídas de N: A) o N-N₂O emitido para atmosfera durante 12 dias de monitoramento após a adubação de cobertura; B) o N-NH₃ volatilizado da ureia, estimado num percentual médio de 30% de volatilização do N aplicado em cobertura (CANCELIER, 2013); C) o N mineral lixiviado ao longo do experimento; e D) o N exportado nos grãos de milho colhidos (NGRAO).

Estoques residuais no sistema após a colheita: I) o estoque de N mineral no solo, na profundidade de 0-60 cm, mensurado após a colheita; e II) o N presente na massa seca da parte aérea do milho (NPALHADA).

O balanço final de N do cultivo foi estimado confrontando-se a diferença entre as entradas e as saídas com o estoque de N residual no sistema após a colheita, obtendo-se o saldo de N não detectado (Equação 4):

$$N \text{ não detectado} = [(1 + 2 + 3 + 4 + 5) - (A + B + C + D)] - (I + II) \quad \text{Equação (4)}$$

2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos a análises de variância (Teste F) com utilização do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011), observando-se os delineamentos peculiares a cada variável em questão. Quando as diferenças entre tratamentos foram significativas, compararam-se as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Em alguns casos, os dados também foram analisados ajustando-se modelos de regressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Emissão de óxido nitroso (N₂O)

A emissão de N-N₂O foi significativamente influenciada pela adubação nitrogenada no milho, sendo o maior valor médio (27,07 g de N-N₂O ha⁻¹ dia⁻¹) encontrado no tratamento com a dose mais elevada em cobertura, correspondente a 396 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. Os menores níveis de emissão, equivalentes a 1,64 e 3,83 g de N-N₂O ha⁻¹ dia⁻¹, foram detectados, respectivamente, no controle sem N em cobertura e no tratamento com a dose mais baixa, de 60 kg ha⁻¹ de N.

A dinâmica do nitrogênio aplicado via ureia segue uma sequência de processos de transformação que se inicia com a hidrólise da molécula do adubo, na qual o N se apresenta na forma amídica [(NH₂)₂CO]. O primeiro produto formado na hidrólise é a forma gasosa amônia (NH₃), que pode ser perdida do sistema por volatilização caso não seja rapidamente convertida no íon amônio (NH₄⁺). Por sua vez, o amônio presente no solo em condições de aerobiose geralmente tende a ser transformado em nitrato (NO₃⁻). O N na forma de nitrato está sujeito à lixiviação com a água que percola o solo ou, ainda, sob situações de anaerobiose, pode reagir no processo de desnitrificação formando o íon nitrito (NO₂⁻) ou o gás óxido nitroso, sendo este passível de fluir para a atmosfera (CANTARELLA, 2007), caracterizando a emissão de N₂O.

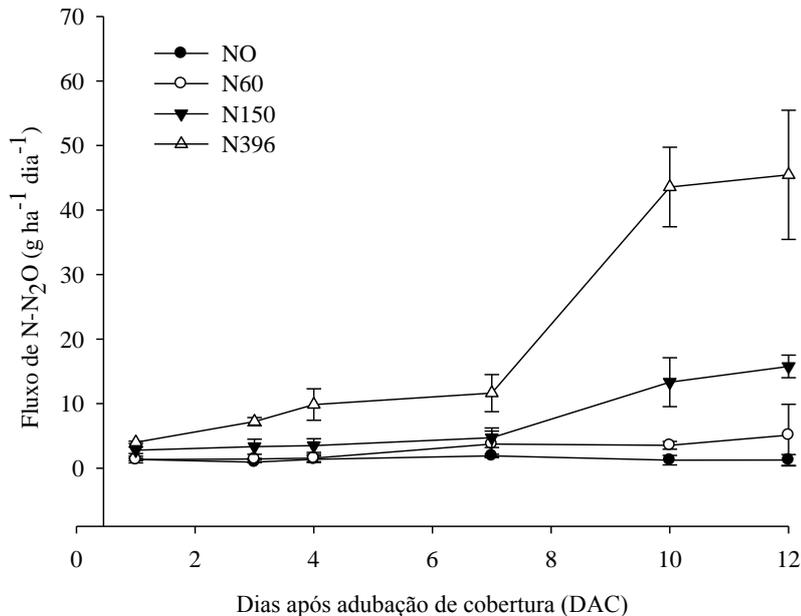
Portanto, o nitrogênio possui dinâmica muito intensa no solo, sendo propenso a vias de perdas do sistema, seja por volatilização de NH₃, por lixiviação de NO₃⁻, ou por emissão de N₂O (ALMEIDA; NAVES; WENDLING, 2015). Embora os atributos físicos dos Latossolos promovam boa aeração, normalmente fluxos pontuais elevados de óxido nitroso para atmosfera ocorrem em situações de queimadas e fertilização associadas à presença de água, seja por precipitação pluviométrica ou por meio de irrigação (CARVALHO, 2005; CARVALHO et al., 2006).

Durante os 12 dias de monitoramento, o fluxo médio de N-N₂O para a atmosfera foi crescente sobretudo nos tratamentos que receberam maiores doses de N em cobertura, principalmente na segunda semana após a aplicação da ureia (Figura 4). Esses resultados corroboram o padrão de emissão observado por Signor, Cerri e Conant (2013) para regiões produtoras de cana de açúcar no Brasil, em que a influência do adubo nitrogenado foi mais evidente da primeira à segunda semana após a aplicação e geralmente desapareceu após dois meses.

Logo após a adubação de cobertura, houve significativo aumento da umidade do solo em decorrência de uma precipitação de 57 mm na área experimental durante a noite após adubação em cobertura (Figura 2). Tal fato deve ter contribuído para a ureia reagir no solo e propiciado a ocorrência dos processos de conversão do N do sistema para as formas relacionadas às emissões de gases. Entretanto, grande parte dos fluxos de N-N₂O para a atmosfera só foi verificada após decorridos seis dias da cobertura e se estendeu até o final do monitoramento. Nota-se que, na maior dose de N, mais de 70% do fluxo total ocorreu nesse período (Figura 4). Mas é provável que a emissão tenha prosseguido além do intervalo de duração do monitoramento realizado.

Estudo desenvolvido por Hickman et al. (2014), utilizando diferentes doses de fertilizante nitrogenado em solo de savana no Kenya, evidenciou que mais de 60% do fluxo total de N-N₂O ocorreu nas três primeiras semanas após a adubação. Segundo os mesmos autores, os fluxos só foram observados após uma precipitação, ou seja, a partir do aumento da umidade no solo. Sendo assim, os resultados obtidos no presente estudo confirmam esses padrões de resposta.

Figura 4 - Fluxo médio diário de N-N₂O, observado durante 12 dias de monitoramento após a adubação com doses crescentes de N (0 a 396 kg ha⁻¹) em cobertura no milho. As barras verticais indicam o erro padrão. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

A presença do ânion nitrato é ponto de partida para que se desencadeiem emissões de N-N₂O, como consequência de eventual reação de desnitrificação. A condição climática no bioma Cerrado, por ter estações bem definidas, influencia nas reações de nitrificação e desnitrificação, principalmente, quando ocorrem chuvas esporádicas após períodos secos. A variabilidade das precipitações pode vir a estimular a mineralização de matéria orgânica do solo, promovendo a acumulação de nitratos em períodos secos e favorecendo as emissões de N₂O na estação chuvosa (LIU et al., 2014).

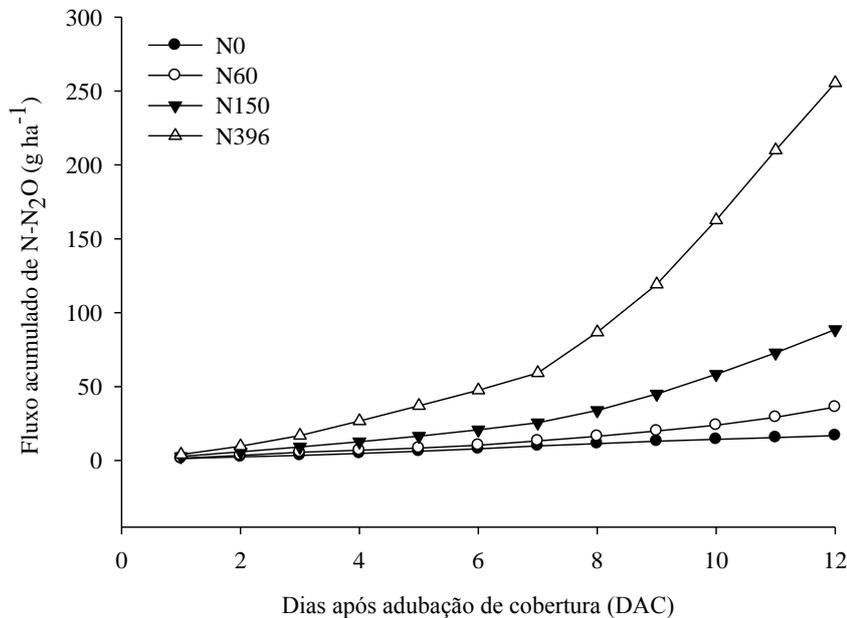
No presente estudo, há que se considerar que algum tempo foi demandado para a formação de quantidades mais expressivas de nitrato depois da aplicação de ureia. Esse aspecto pode explicar, em parte, os menores níveis de emissão de N-N₂O nos primeiros dias seguintes à cobertura (Figura 4). Além das condições de umidade no solo, em que a ocupação do espaço poroso por água leva à diminuição no oxigênio disponível favorecendo o processo de desnitrificação, a disponibilidade de N-NO₃⁻ também interfere no potencial de perdas na forma de óxido nitroso (SMITH et al., 2003; ALMEIDA et al., 2015). Entre 10 e 25 dias após

a adubação em cobertura, foi determinado o nível mais elevado de nitrato no solo (vide tópico seguinte), o que evidencia uma condição de solo mais propensa à desnitrificação coincidindo com a fase de maior emissão de N-N₂O detectada no monitoramento.

Além da aplicação de fertilizantes minerais nitrogenados e da umidade (MARTINS et al., 2015; SOARES et al., 2015; PIMENTEL et al., 2015), outros fatores também afetam as emissões de N₂O, como a incorporação de resíduos orgânicos (BALL et al., 2014), o estágio fenológico da cultura (HAYASHI et al., 2015), a acidez do solo, níveis de fertilidade, e temperatura do ar e do solo (BUTTERBACH-BAHL et al., 2013).

O maior fluxo cumulativo de óxido nitroso (255,0 g ha⁻¹ em 12 dias) foi determinado no tratamento N396, dose mais alta de N em cobertura (Figura 5), e equivaleu a mais de 15 vezes a emissão medida no tratamento controle N0 (16,8 g ha⁻¹ em 12 dias). As quantidades totais emitidas foram proporcionais às doses de nitrogênio aplicadas e, dado o curto período de avaliação, podem ser consideradas de magnitude bastante elevada se comparadas aos relatos de trabalhos que envolveram monitoramento de maior duração. Em estudo conduzido por Alves et al. (2010) em Londrina – PR, cultivando milho em Latossolo com aplicação de 80 kg ha⁻¹ de N na adubação de cobertura em sistemas de plantio direto e plantio convencional, foram registradas emissões líquidas de 100 e 64 g ha⁻¹ de N, respectivamente, durante 136 dias de monitoramento das emissões no primeiro ano. Já no segundo ano, as emissões foram de 50 e 21 g ha⁻¹ de N sob plantio direto e plantio convencional, durante 141 dias de monitoramento.

Figura 5 - Fluxo cumulativo de N-N₂O durante 12 dias de monitoramento após a adubação com doses crescentes de N (0 a 396 kg ha⁻¹) em cobertura na cultura do milho. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

Diversos estudos, conduzidos por Bouwman (1996), quantificaram as emissões de N₂O em solos agrícolas com diferentes culturas e doses de N, mostrando que, para cada 100 kg de N na adubação, 1,25 kg de N na forma de N₂O era produzido. Com base nesse estudo, essa relação foi recomendada pelo Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC, 1997) como um fator de emissão para ser utilizado na preparação de inventários de gases de efeito estufa. Ressalta-se que, poucos estudos sobre emissão de N₂O estão disponíveis para as regiões tropicais, e a maioria dos resultados obtidos sugerem que essa emissão ocorre em magnitude bem menor do que aquelas consideradas nas bases de dados usadas pelo IPCC (JANTALIA et al., 2006). No presente estudo, foram estimados fatores de emissão da ordem de 0,03%; 0,05% e 0,06% para os tratamentos que receberam 60, 150 e 396 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Ressalta-se que, mesmo sendo verificada diferença estatística significativa entre os tratamentos para as perdas de N-N₂O, esses fatores de emissão estão muito abaixo do valor apontado pelo (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 1997).

Nas condições de Santo Antônio de Goiás – GO, em cultivos de milho, arroz de terras altas e feijão fertilizados com 80 kg ha⁻¹ de N, com irrigação sob plantio direto, a emissão de N₂O líquida em 140 dias de monitoramento foi de 190 g ha⁻¹ de N, gerando fator

de emissão de 0,24% (ALVES et al., 2010). Os autores ressaltaram ainda que o efeito da adubação nitrogenada sobre os fluxos de N_2O do solo durou mais de um mês, provavelmente pelo efeito da irrigação.

Estudo desenvolvido por Desunbury et al. (2008) mostra que os fatores de emissão de $N-N_2O$ obtidos em áreas agrícolas podem variar de 0,17 a 6,8% do N adicionado via ureia. Os níveis de emissão desse gás são muito variáveis e dependentes das condições climáticas, da época de aplicação do adubo nitrogenado, do tipo de solo e da cultura utilizada (HAYASHI et al., 2015; BUTTERBACH-BAHL et al., 2013; MARTINS et al., 2015; SOARES et al., 2015; PIMENTEL et al., 2015). A grande variação nos resultados evidencia a dificuldade de se estabelecerem índices de emissões globais (JANTALIA et al., 2006). Não obstante, embora as emissões de $N-N_2O$ em sistemas agrícolas apresentem pequena importância econômica, elas são ambientalmente significativas e, portanto, não podem ser desconsideradas.

3.2 Amônio e nitrato no solo

Ao longo do período de avaliação, entre as diferentes doses de N em cobertura, os teores de $N-NO_3^-$ no solo variaram de 6 a 11, 7 a 12 e 6 a 8 $mg\ kg^{-1}$ nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, respectivamente. No caso dos teores de $N-NH_4^+$, as variações foram de 5 a 9, 6 a 10 e 4 a 8 $mg\ kg^{-1}$, respectivamente.

Existem tentativas de se utilizar valores críticos dos teores dessas formas de N no solo visando o aprimoramento do manejo da adubação nitrogenada do milho no Brasil. Nesse sentido, a partir de experimentação em Argissolo Vermelho na região de Eldorado do Sul – RS, o teor de $N-NO_3^-$ no solo entre 20 a 30 $mg\ kg^{-1}$ na camada de 0-30 cm foi sugerido por Rambo et al. (2007) como valor crítico em pré-cobertura do milho, no estágio fenológico V6. No presente estudo, no entanto, os teores detectados no solo durante o cultivo e sob doses crescentes de N não alcançaram aquela faixa indicadora do nível crítico, revelando que o Latossolo em questão parece apresentar baixa capacidade de retenção dessa forma de N.

Os estoques de $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ e nitrogênio mineral (N-Mineral) no solo foram influenciados pelo efeito isolado dos fatores dose de N, profundidade e época de amostragem (Tabela 6). Na média das profundidades e época avaliadas, observa-se que os estoques de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ no solo aumentaram com as doses de nitrogênio aplicadas, alcançando 18,4

kg ha⁻¹ e 22,1 kg ha⁻¹, respectivamente, no maior nível de adubação. Esses valores representam cerca de 75% a mais em relação à menor dose aplicada (Tabela 7).

Tabela 6 - Resumo da análise de variância para os estoques de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e N-Mineral no solo. Sete Lagoas – MG, 2015.

Fontes de Variação	GL	Quadrado Médio		
		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Mineral
Dose N - D	2	1176,07**	1708,00**	5716,96**
Bloco (D)	6	251,76 ^{ns}	70,87 ^{ns}	195,17 ^{ns}
Profundidade - P	2	288,24 **	315,43**	1203,15**
D x P	4	5,21**	98,23 ^{ns}	125,96 ^{ns}
Erro 1	12	68,16 ^{ns}	42,42 ^{ns}	177,47 ^{ns}
Época - E	7	280,75 **	981,64**	2263,24**
D x E	14	31,46**	48,52 ^{ns}	148,08 ^{ns}
P x E	14	19,82 ^{ns}	27,67 ^{ns}	70,82 ^{ns}
D x P x E	28	4,32 ^{ns}	27,67 ^{ns}	70,82 ^{ns}
Erro 2	126	74,43 ^{ns}	5,62 ^{ns}	11,89 ^{ns}
Total	215			
CV 1 (%)		58,8	38,55	43,09
CV 2 (%)		61,53	41,25	36,78
Média geral		14,02	16,89	30,91

Fonte: Do autor, 2018.

Mesmo em áreas de cerrado nativo, verifica-se ampla variabilidade nos estoques de amônio e nitrato no solo. Martins et al. (2015) encontram níveis de N-NH₄⁺ variando entre 0,4 e 20 kg ha⁻¹ e de N-NO₃⁻ entre 9,7 e 49,6 kg ha⁻¹, na camada de 0-10 cm de profundidade numa área de cerrado natural. Já os resultados obtidos por Cruvinel et al. (2011), na profundidade de 0-5 cm, foram de 20,4 e 106,2 kg ha⁻¹, respectivamente, para N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻.

Os dados do presente estudo indicam baixa retenção pelo solo dos íons amônio e nitrato, quando comparado às informações de outras áreas cultivadas em solos de cerrado. Valores bem maiores foram quantificados por Hickmann (2014) durante o cultivo de milho sob semeadura direta em Latossolo Vermelho Amarelo argiloso na região dos Campos das Vertentes – MG. No tratamento que recebeu de 83 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 198 kg ha⁻¹ de

N em cobertura, esse autor encontrou estoques de 164 kg ha⁻¹ de N-NH₄⁺ e mais de 250 kg ha⁻¹ de N-NO₃⁻ nas camadas de 0 a 60 cm de profundidade, aos 17 dias após a cobertura. Silva et al. (2012) quantificaram estoques de 92 e 43 kg ha⁻¹ de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, respectivamente, na camada de 0-30 cm do perfil de um Latossolo Vermelho argiloso cultivado com milho na região de Sete Lagoas-MG, adubado com 350 kg ha⁻¹ de NPK 09-33-12 e dejetos líquidos de suíno em cobertura.

Tabela 7 - Estoques de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e N-Mineral no solo, em função de doses de N em cobertura, profundidades e épocas de amostragem. Sete Lagoas – MG, 2015.

		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Mineral
-----kg ha ⁻¹ -----				
Dose	Efeito de Dose (média das profundidades e épocas)			
N60		10,5 b	12,5 c	23,0 c
N150		13,1 b	16,0 b	29,1 b
N396		18,4 a	22,1 a	40,5 a
Profundidade	Efeito de Profundidade (média de doses e épocas)			
0-20 cm		14,1 ab	17,3 ab	31,4 ab
20-40 cm		15,9 a	18,7 a	34,6 a
40-60 cm		11,9 b	14,6 b	26,5 b
Época (Dias após a cobertura – DAC)	Efeito de Época (média de doses e profundidades)			
-31 DAC -	Antes da adubação	10,8 bc	11,9 cd	22,8 e
10 DAC -	Estádio fenológico V5	15,2 abc	21,4 ab	36,7 abc
17 DAC -	Estádio fenológico V7	18,7 a	25,8 a	44,6 a
25 DAC -	Estádio fenológico V8	17,4 ab	23,0 ab	40,4 ab
37 DAC -	Estádio fenológico VT	14,7 abc	17,7 bc	32,4 bcd
71 DAC -	Estádio fenológico R1	13,4 abc	14,0 cd	27,4 cde
89 DAC -	Estádio fenológico R2	12,5 abc	11,0 d	23,6 de
148 DAC -	Pós-colheita	9,1 c	9,9 d	19,1 e

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: Do autor, 2018.

Na média das doses e épocas avaliadas, os estoques de N-NO₃⁻, assim como de N-NH₄⁺ e N-mineral no solo, foram mais expressivos nas camadas de 0-20 e 20-40 cm (Tabela 7). A tendência de maiores valores na profundidade de 20-40 cm evidencia ser essa uma zona de retenção de amônio e nitrato no perfil a partir da lixiviação desses íons da camada

superficial. O N-NO₃⁻ foi a forma predominante no perfil do solo em todas as profundidades avaliadas.

A adubação promove maior disponibilidade de N em formas minerais no solo (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻), que em condições adequadas de umidade acentuam os processos microbiológicos. O NH₄⁺ tende a ser oxidado a NO₃⁻ pela reação de nitrificação, mediada por bactérias autotróficas (SILVA & VALE, 2000), o que favorece a manutenção de menores teores de NH₄⁺ no solo, por ser um produto intermediário para a formação de NO₃⁻. Os estoques de N-NO₃⁻, representaram por volta de 54% do N-mineral no solo em todas as doses aplicadas (Tabela 7). Se poderia esperar uma predominância ainda maior da forma nítrica, considerando a absorção preferencial de NH₄⁺ pelas raízes do milho (BREDEMEIER e MUNDSTOCK, 2000).

Ao longo do cultivo do milho foram aplicados 510 mm de água via irrigação, que somados aos 339 mm de precipitação totalizaram 850 mm no decorrer do ciclo da cultura. A abundância de água, aliada às boas condições de drenagem do Latossolo, provavelmente contribuíram para o deslocamento dos íons nitrogenados no perfil. De acordo com Aita e Giacomini (2008), elevadas doses de N mineral, combinadas com altas temperaturas e precipitações potencializam o deslocamento principalmente do NO₃⁻ para camadas mais profundas.

Por ser fracamente retido nas cargas positivas dos colóides, o ânion NO₃⁻ tende a permanecer mais em solução, principalmente nas camadas superficiais do solo, onde a presença de matéria orgânica acentua o caráter eletronegativo da fase sólida e há prevalência de fosfatos nos processos de adsorção aniônica. Dessa forma, o nitrato fica propenso ao processo de lixiviação e pode ser carregado para maiores profundidades no perfil do solo. Já no caso do NH₄⁺, a lixiviação é reduzida pela adsorção deste cátion no complexo de cargas negativas do solo, embora a capacidade de adsorção do NH₄⁺, de acordo com a série liotrópica, seja menor em relação a outros cátions como Ca e Mg (JADOSKI et al., 2010).

Na média das doses de N e profundidades avaliadas, os estoques de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ foram crescentes até 17 dias após adubação de cobertura (DAC) atingindo valores máximos de 18,7 e 25,8 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 7). Após esse período, sofreram redução ao longo do ciclo do milho e voltaram praticamente aos níveis iniciais por volta dos 148 DAC (pós-colheita), com estoques aproximados de 9 a 10 kg ha⁻¹.

O monitoramento de amônio e nitrato ao longo do ciclo (Tabela 7) evidenciou claro impacto nos seus estoques aos 10 DAC, quando parte da ureia [(NH₂)₂CO] já havia sido hidrolisada formando N-NH₄⁺ e, em seguida, N-NO₃⁻. Considerando que parte do reservatório

de nitrogênio orgânico total do solo é mineralizado no decorrer de um ano ao longo do tempo, boa proporção do estoque de N-mineral presente antes da adubação de cobertura pode ter sido derivada dos processos de decomposição da matéria orgânica previamente existente no solo (Tabela 3) e da ciclagem da palhada de crotalária e milho (Tabela 4), somando-se à contribuição da adubação de semeadura.

Aos 25 DAC, quando os estoques de amônio e nitrato começaram a baixar no solo, as plantas de milho se encontravam no estágio V8 (oito folhas totalmente desenvolvidas), período no qual a capacidade de absorção de nutrientes aumenta devido ao sistema radicular mais desenvolvido (RAMBO et al., 2004). Atingido o estágio fenológico V8-V9, passa a ocorrer intensa absorção de nutrientes, notadamente nitrogênio, para satisfazer as necessidades da cultura (FANCELLI, 2015). Portanto, o fluxo de nitrogênio do solo para acumulação nas plantas de milho explicaria, em parte, o padrão temporal decrescente dos estoques de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo.

3.3 Nitrato e amônio lixiviados

Sendo 1,80 m a profundidade dos lisímetros de drenagem existentes na área experimental, consideram-se como lixiviados para fora da zona de absorção radicular os íons amônio e nitrato quantificados na solução percolada. A lixiviação de N-NH_4^+ e N-NO_3^- foi significativamente influenciada pela interação dos fatores dose de N em cobertura e época de coleta da solução percolada do solo (Tabela 8).

De forma geral, os coeficientes de variação (CV) foram altos, apontando baixa homogeneidade entre repetições no conjunto de dados obtido a partir das coletas nos lisímetros ao longo do ciclo do milho. Este fato evidencia as dificuldades operacionais e metodológicas envolvidas no monitoramento de N lixiviado, assim como de outros compartimentos desse nutriente no solo, conforme destacado por Mattos Júnior et al. (1995). Na média das 16 épocas de coleta, os maiores índices de lixiviação de nitrogênio ocorreram no tratamento com a maior dose aplicada N396, correspondendo a $1,55 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-Mineral (Tabela 9).

Tabela 8 - Resumo da análise de variância para N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e N-Mineral lixiviados. Sete Lagoas – MG, 2015.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Mineral
Dose - D	2	0,329**	3,683 ^{ns}	5,966**
Repetição (D)	6	0,026 ^{ns}	0,838 ^{ns}	1,150 ^{ns}
Erro 1	4	0,018	0,632	0,853
Época – E	15	2,010**	13,849**	26,334**
D x E	30	0,037**	0,391**	0,583**
Erro 2	86	0,008	0,121	0,149
Total	143			
CV 1 (%)		39,00	89,80	74,68
CV 2 (%)		26,02	39,30	31,30
Média geral		0,35	0,88	1,23

Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 9. Lixiviação de N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e N-Mineral, sob efeito de doses de nitrogênio aplicado em cobertura. Média das épocas de coleta do percolado. Sete Lagoas – MG, 2015.

Dose	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-Mineral
	------(kg ha ⁻¹)-----		
N60	0,27 b	0,57 a	0,85 b
N150	0,33 b	0,96 a	1,29 ab
N396	0,44 a	1,11 a	1,55 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor, 2018.

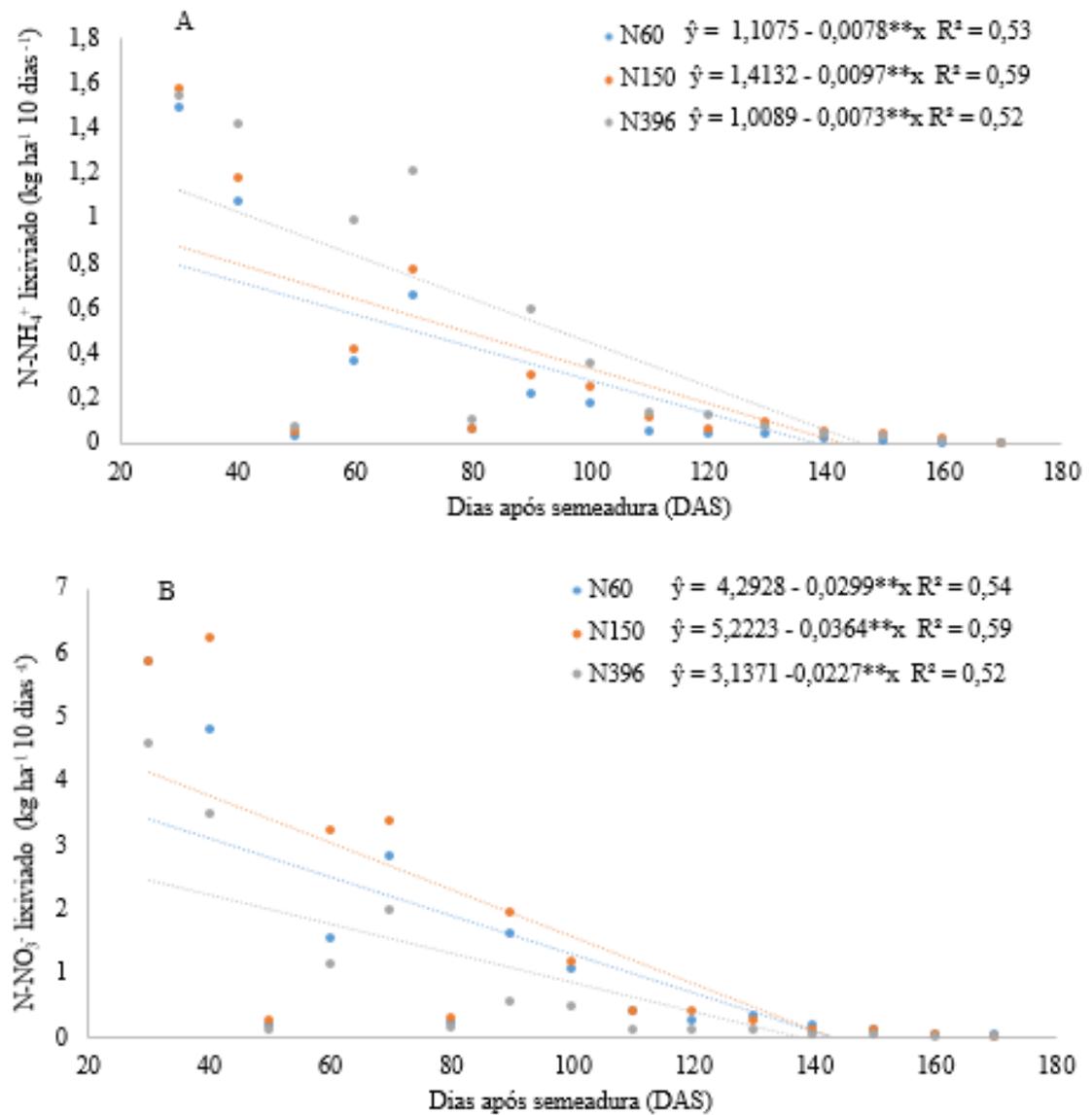
Para apresentação de resultados do desdobramento da interação entre os fatores doses de N e épocas de coleta do percolado, os dados foram organizados e plotados por intervalos de dez dias (Figura 6), de modo a expressar as taxas de lixiviação acumuladas em cada decêndio, a partir do período imediatamente anterior à adubação de cobertura até o término

das coletas após a colheita. Em todas as doses de N fornecidas, a lixiviação de N-NO_3^- foi maior que a de N-NH_4^+ , representando mais de 70% do N-Mineral lixiviado.

Tanto para amônio quanto para nitrato, taxas relativamente maiores de perdas por lixiviação foram observadas em todas as doses de N nos dois primeiros decêndios após a adubação de cobertura, até por volta dos 40 DAS (Figura 6). Embora as linhas de tendência sinalizem decréscimo das taxas de lixiviação no decorrer do ciclo do milho, nota-se a ocorrência de alguns picos ao longo do período de monitoramento, o que inviabilizou a definição de modelos de regressão com bom ajuste. Tais picos alternaram com momentos de perdas de menor intensidade até próximo dos 150 DAS, quando, sem novas entradas de água via chuva ou irrigação, praticamente cessou a lixiviação.

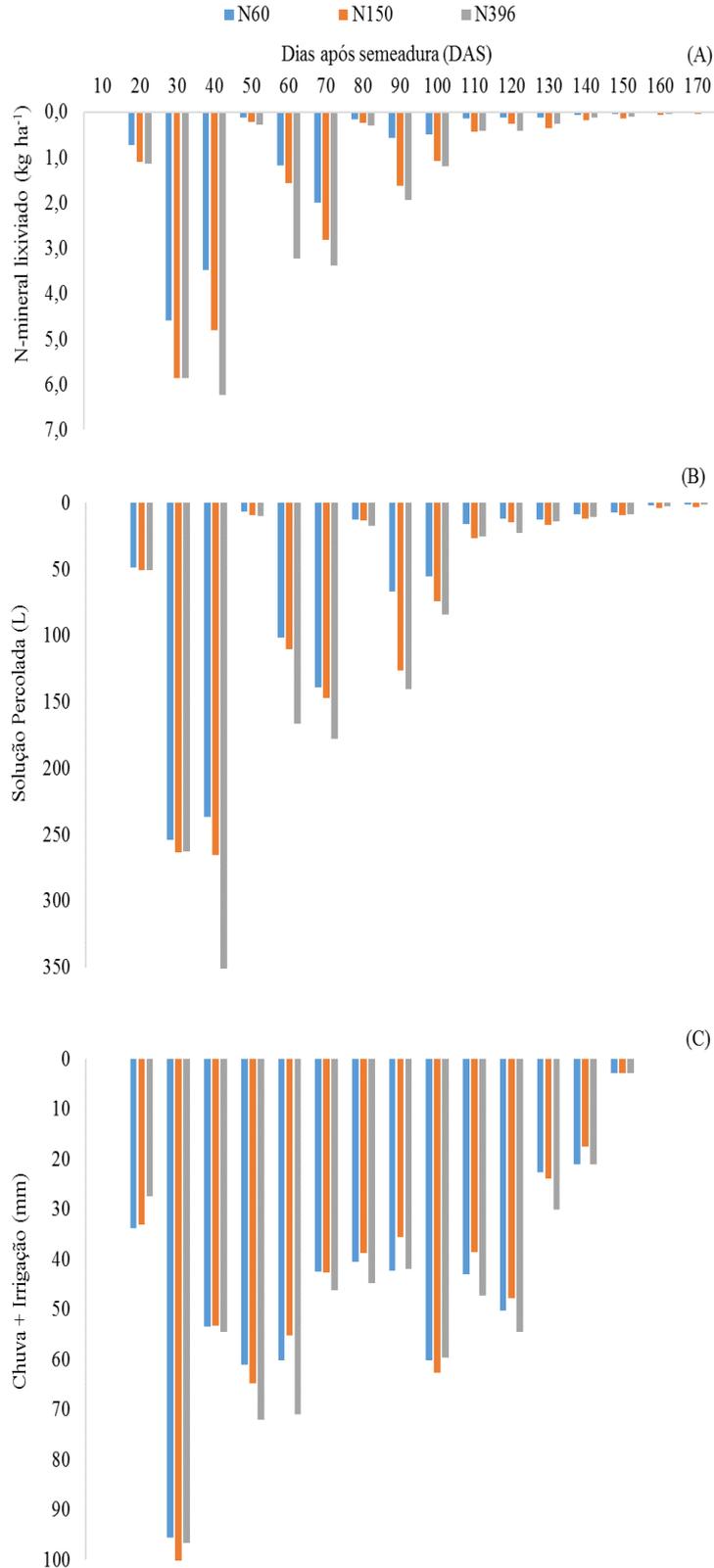
Dois picos de lixiviação ocorreram nos dois decêndios após a adubação de cobertura (período de 21 a 40 DAS), correspondendo a perdas de 8,1; 10,7 e 12,1 kg ha^{-1} de N nas doses N60, N150 e N396, respectivamente (Figura 7 A). Ou seja, nesse intervalo de tempo houve deslocamento aproximado de 59, 51 e 49% em relação ao total de N-mineral lixiviado durante todo o ciclo do milho naquelas doses. De forma geral, verifica-se que as medidas mais elevadas de lixiviação coincidiram com os períodos de maiores volumes de solução percolada (Figura 7 A e B). A quantidade de solução percolada, por sua vez, nem sempre esteve nitidamente associada às entradas de água via chuva ou irrigação (Figura 7 C), talvez por influência da maior ou menor absorção pelo dossel de plantas para atender à demanda por evapotranspiração em diferentes momentos.

Figura 6 - Lixiviação de N-NH_4^+ (A) e de N-NO_3^- (B), com base em dados agrupados por decênio de monitoramento ao longo do ciclo do milho, para doses de 60 a 396 kg ha^{-1} de N em cobertura aos 22 dias após a semeadura. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

Figura 7 - Lixiviação de N-Mineral (A), volume de solução percolada nos lisímetros (B) e entrada de água via chuva + irrigação (C), por decêndio ao longo do cultivo de milho, para doses de 60 a 396 kg ha⁻¹ de N em cobertura. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

A aplicação de fertilizantes pode fazer com que a solução do solo apresente concentração de nutrientes acima do necessário para suprir a demanda das plantas, favorecendo as perdas por lixiviação em situações de maior precipitação pluviométrica (ADAMS; FRANTZ e BUGBEE, 2013). De acordo com os dados climatológicos (Figura 2, Tabela 5), o volume total de precipitação ao longo de todo experimento ficou em torno de 339 mm. Do primeiro até os 22 DAS, o volume acumulado de chuvas foi de 244 mm, sendo 58 mm aos 22 DAS, na noite após a aplicação da ureia em cobertura. Essa precipitação concentrada em espaço de tempo relativamente curto, possivelmente, gerou excedente hídrico que favoreceu os picos de lixiviação nos decêndios imediatamente após a adubação de cobertura (Figura 7 A), à medida que a ureia foi sendo hidrolisada para a forma de amônio e essa convertida a nitrato pela nitrificação.

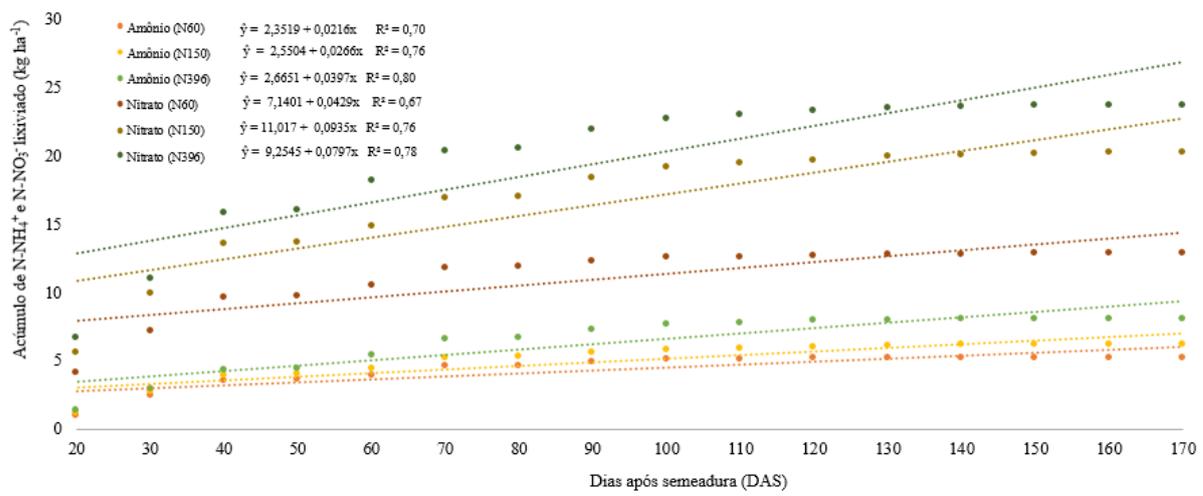
No decorrer do ciclo, a precipitação diminuiu, sendo então as entradas de água oriunda das irrigações (Figura 2). É razoável supor que a irrigação dimensionada para atender à demanda evapotranspiratória da cultura não deve ter gerado maiores excedentes de água no solo, o que restringiu o potencial de lixiviação de N com o avançar do desenvolvimento das plantas. Essas circunstâncias poderiam explicar os baixos índices de percolação de solução do solo (Figura 7 B) e a lixiviação decrescente (Figura 7 A) a partir da fase de polinização do milho aos 90 DAS.

As perdas totais por lixiviação de N-mineral (amônio + nitrato) no período que compreendeu o ciclo do milho foram de 13,8; 20,8 e 25,0 kg ha⁻¹ para as doses N60, N150 e N396, respectivamente (Figuras 7 e 8). Percebe-se que as diferenças na lixiviação não foram exatamente proporcionais às variações nas doses de N em cobertura. A relação entre a maior e a menor dose de N aplicada foi de 6,6 vezes, enquanto a relação entre as quantidades lixiviadas nesses tratamentos foi de 1,8 vez. Embora um dos tratamentos do presente estudo representasse uma dose exagerada para a adubação de cobertura do milho, a fração lixiviada não se mostrou tão proeminente nessa condição.

Esse padrão de resposta foi observado também no trabalho de Gollany et al. (2004) que, em pesquisa de longa duração desenvolvida na Universidade de Minnesota nos EUA, avaliaram os efeitos da aplicação de doses de 20 e 200 kg ha⁻¹ de N para o milho em solos argilosos, encontrando valores médios de N-NO₃⁻ lixiviado de 32 e 78 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Nesse caso, a relação entre as doses foi de 10 vezes, enquanto as

quantidades lixiviadas variaram cerca de 2,4 vezes. Portanto, pode-se inferir que aplicações de quantidades mais elevadas de nitrogênio não necessariamente implicam em níveis de lixiviação igualmente elevados, em se tratando de solos argilosos.

Figura 8 - Lixiviação acumulada de N-NH_4^+ e de N-NO_3^- durante o ciclo do milho, após a aplicação de doses de 60, 150 e 396 kg ha^{-1} de N em cobertura. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

Os totais lixiviados ao longo do ciclo do milho variaram 4,5 a 7,1 kg ha^{-1} de N-NH_4^+ e de 9,2 a 17,8 kg ha^{-1} de N-NO_3^- entre as doses N60 a N396 (Figura 8). Devido à dinâmica do N nos solos tropicais favorecer a nitrificação, em princípio, poderia se esperar lixiviação mais expressiva do nutriente na forma NO_3^- , e sobretudo nos lisímetros que receberam doses mais elevadas na adubação de cobertura. Entretanto, verifica-se que também ocorreu lixiviação de N-NH_4^+ em proporção considerável. Situações semelhantes são constatadas na literatura. Silva, Pierangeli e Machado (2013), em pesquisa desenvolvida no Mato Grosso testando doses de resíduo bovino e ureia em Latossolo e Argissolo, verificaram lixiviação de amônio e nitrato nos dois casos. Silva et al. (2012), em estudo conduzido em Sete Lagoas – MG, avaliando a dinâmica do nitrogênio no perfil de um Latossolo de cerrado adubado com dejetos de suíno e adubo mineral, mostraram que houve lixiviação tanto de amônio quanto de nitrato no cultivo do milho.

Em face do risco que representa a concentração de nitrato na água para o consumo humano, esta não deve exceder a 10 mg L^{-1} de N-NO_3^- , de acordo com os limites adotados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente e pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2001).

Esses limites são os mesmos adotados em vários países, como atualmente pela Agência Ambiental dos Estados Unidos - USEPA. No presente estudo, os maiores teores de N-NO_3^- na solução percolada foram detectados logo após a adubação nitrogenada em cobertura, nas medições das coletas referentes aos decêndios 30 e 40 DAS. O teor de máximo de N-NO_3^- determinado foi de $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, na solução percolada de um dos lisímetros do tratamento N396, numa das ocasiões de coleta. À exceção desse dado, todas as demais medidas não ultrapassaram o padrão máximo determinado pela legislação ambiental vigente.

Em relação aos teores de N-NH_4^+ , não há padrões específicos estabelecidos como limite. Contudo, há definição do teor máximo de nitrogênio amoniacal total, equivalente a $3,7 \text{ mg L}^{-1}$ para água doce (CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA, 2005). O maior teor de N-NH_4^+ encontrado nas amostras correspondeu a $3,6 \text{ mg L}^{-1}$, determinado numa das coletas de um dos lisímetros do tratamento N396.

3.4 Nitrogênio extraído pelo milho e produtividade de grãos

Os tratamentos com doses de N em cobertura tiveram efeito estatisticamente significativo sobre os teores foliares do nutriente (NF) e a produção de massa seca total da parte aérea (MST) do milho, porém não impactaram na quantidade de N acumulada pelas plantas (NPLANTA). Essas três variáveis foram influenciadas também pela época de avaliação ao longo do ciclo da cultura (Tabela 10).

Na média das épocas de avaliação, o maior valor de NF ($3,55 \text{ dag kg}^{-1}$) foi encontrado na dose mais alta N396, mas não houve diferença entre N60 e N150. Já com base na MST, verifica-se que a dose mais baixa N60 implicou em menor desenvolvimento do milho (Tabela 11). Por ser um dos constituintes de proteínas, o N interfere diretamente no processo fotossintético (ANDRADE et al., 2003), de modo que uma maior oferta do nutriente resulta no aumento da taxa fotossintética, levando, conseqüentemente, à maior acumulação de biomassa na planta (SILVA, 2016). Esse ganho de biomassa, por sua vez, estimula a absorção radicular (BENDER, et al., 2013), promovendo um efeito incremental no processo de acúmulo de N pelas plantas. Todavia, nota-se que não houve efeito de doses para o acúmulo de N pelo milho (Tabelas 10 e 11). Esse resultado sugere que o ambiente de cultivo já estava bem suprido em N, de modo que, ao contrário do esperado, foram menos evidentes os efeitos dos níveis crescentes fornecidos em cobertura. A aplicação de 60 kg ha^{-1} de N já foi suficiente

para atender à capacidade de extração daquele cultivo de milho e não diferiu em relação às doses mais elevadas.

Tabela 10 - Resumo da análise de variância para teor foliar de N (NF), massa seca total da parte aérea (MST) e acúmulo de nitrogênio na planta (NPLANTA). Sete Lagoas – MG, 2015.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		NF	MST	NPLANTA
Dose - D	2	0,43**	2428774,33**	919,82 ^{ns}
Repetição (D)	24	0,04 ^{ns}	561886,65 ^{ns}	319,76 ^{ns}
Erro 1	16	0,02	470552,20	270,90
Época - E	6	24,76**	1,97**	215081,69**
D x E	12	0,07 ^{ns}	1628151,90**	330,24 ^{ns}
Erro 2	128	0,04	685909,98	205,30
Total	188			
CV1 (%)		4,45	8,63	12,56
CV2 (%)		6,10	10,42	10,93
Média geral		3,46	7.945,62	131,08

Fonte: Do autor, 2018.

Tabela 11 - Teor de nitrogênio foliar (NF), acúmulo de nitrogênio na planta (NPLANTA), massa seca total da parte aérea (MST), produtividade de grãos (PROD) e acúmulo de nitrogênio nos grãos (NGRAO) de milho, em resposta a doses de N na adubação de cobertura. Sete Lagoas – MG, 2015.

Dose N	NF*	MST*	NPLANTA*	PROD	NGRAO
	--- dag kg ⁻¹ ---	-----kg ha ⁻¹ -----			
N60	3,39 b	7.720 b	128,8 a	10.834	120,5
N150	3,43 b	8.038 a	128,9 a	11.040	118,0
N396	3,55 a	8.077 a	135,5 a	11.454	119,9
Média	3,46	7.946	131,1	10.696	119,5
Geral					

* Média das sete épocas de avaliação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor, 2018.

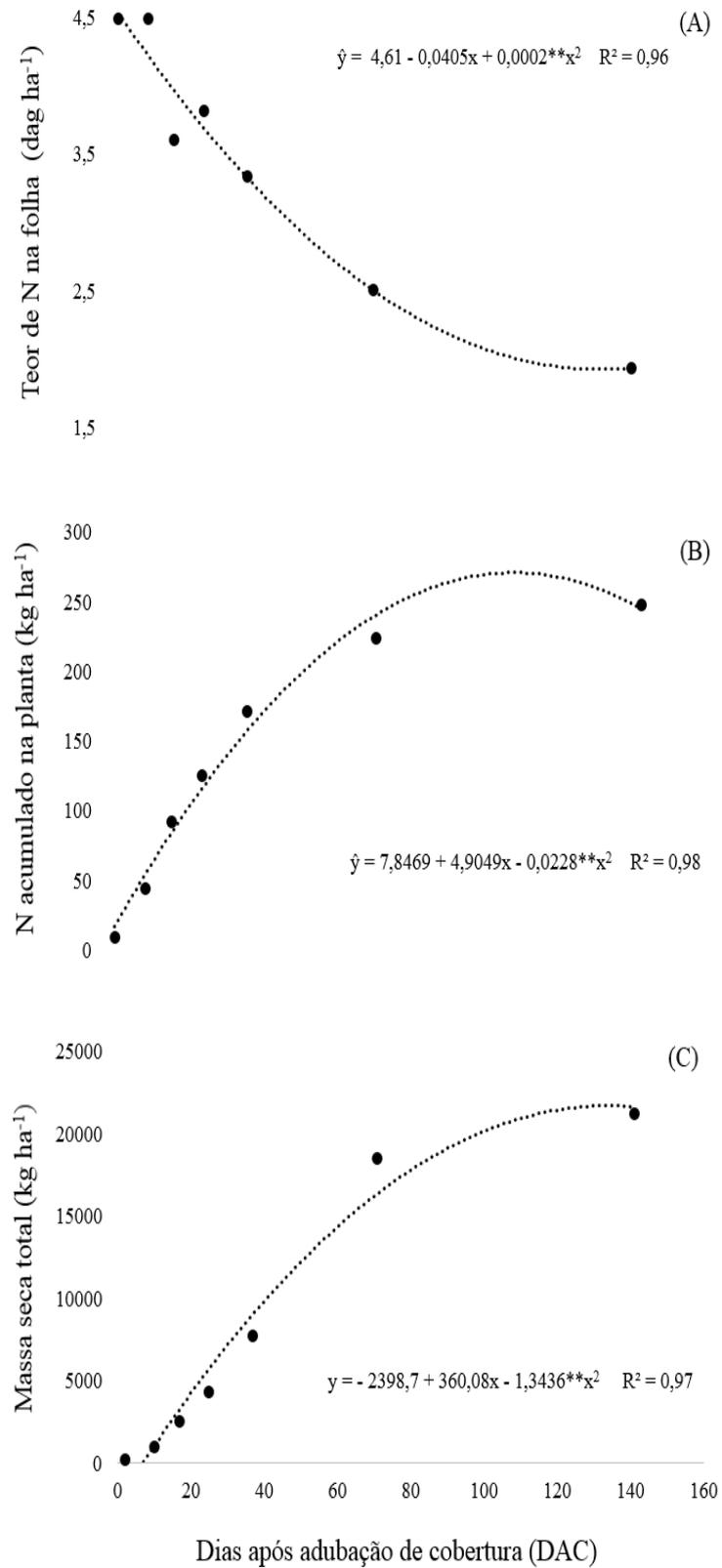
Considerando o tempo decorrido da cobertura nitrogenada até o final do ciclo, verifica-se que apesar de haver diminuição no teor foliar de N à medida que as plantas

criaram produzindo mais massa seca, o conteúdo do nutriente acumulado pelo milho aumentou continuamente até a maturação fisiológica no estágio R6 (Figura 9 A). No milho, ocorre intensa absorção de nutrientes nos estádios fenológicos V8-V9, especialmente de potássio e nitrogênio, para satisfazer as necessidades da planta em fases posteriores (FANCELLI, 2015). Dessa forma, o padrão decrescente de NF com o avanço do desenvolvimento da cultura se deveu ao efeito de diluição (JARREL e BEVERLY, 1981) da concentração nas folhas à medida que aumentou a biomassa de folhas e outros órgãos (Figura 9 A e B), e também devido ao efeito de redistribuição para os grãos (FAQUIN, 2005).

A produtividade de grãos relativamente alta evidencia que o adubo nitrogenado em cobertura aplicado na menor dose (N60) já foi suficiente para suprir a demanda nutricional do milho, para o potencial produtivo alcançado no experimento (Tabela 11). Nota-se também que o solo antes da semeadura já apresentava condições bastante favoráveis ao cultivo de milho. Certamente, os teores de matéria orgânica do solo (Tabela 3), juntamente com o N proveniente da mineralização da palhada de milho + crotalária (Tabela 4) e da adubação de semeadura (36 kg ha^{-1} de N), já garantiram parte expressiva do que seria requerido pelas plantas de milho ao longo do ciclo.

De acordo com Fontoura e Bayer (2009), a quantidade de N que o milho necessita absorver varia de acordo com a faixa de rendimentos da cultura. Segundo esses autores, para rendimentos entre 8.000 e $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de grãos, o milho cultivado sob plantio direto no Paraná e no Rio Grande do Sul absorveu, em média, 105 kg ha^{-1} de N, e para a faixa de rendimentos entre 10.000 e $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$, a absorção chegou a cerca de 185 kg ha^{-1} de N. No presente estudo, no estágio de maturação fisiológica (R6), o milho havia acumulado na planta 228 , 225 e 221 kg ha^{-1} de N nas doses N60, N150 e N396, respectivamente. Esse nível de absorção mostra-se compatível, portanto, com as produtividades ora alcançadas.

Figura 9 - Teor de nitrogênio foliar (A), acúmulo de nitrogênio na planta (B) e massa seca total da parte aérea (C), em função de épocas de amostragem. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

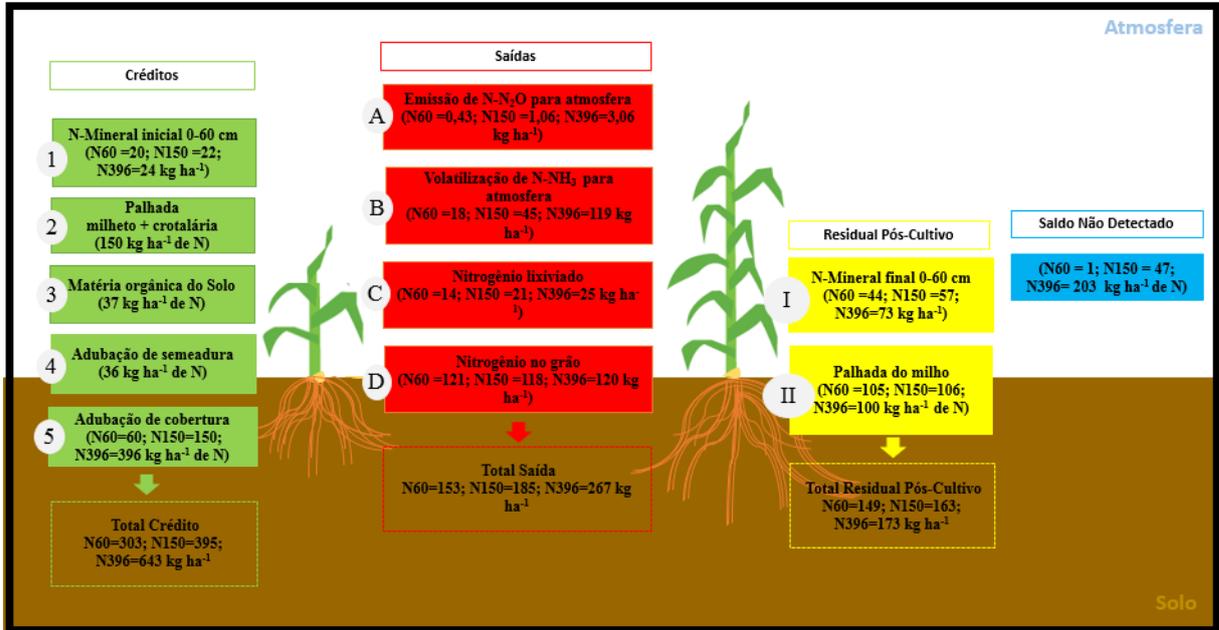
Os valores de acúmulo ou exportação de N nos grãos foram muito semelhantes, independentemente da quantidade do nutriente fornecida em cobertura (Tabela 11). A colheita dos grãos removeu cerca de 121, 118 e 120 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a 53, 53 e 54 % do total extraído pela cultura nas doses N60, N150 e N396, respectivamente. Esse nivelamento de respostas reforça a constatação de que o menor aporte de N em cobertura (N60) já supriu o necessário para o patamar produtivo do milho nas condições do experimento e, conseqüentemente, quantidades adicionais do nutriente levaram à redução da eficiência de aproveitamento do fertilizante. Vale mencionar que a época de semeadura tardia (03/03/2015) possivelmente foi um fator limitante ao potencial produtivo do híbrido utilizado, pela ocorrência de períodos com temperaturas baixas desfavoráveis à cultura (Tabela 5), implicando em menor chance de resposta aos níveis de N em cobertura.

3.5 Estimativa do balanço de nitrogênio no cultivo de milho

A partir de variáveis mensuradas no experimento e de estimativas baseadas na literatura para algumas variáveis não avaliadas, buscou-se calcular o balanço de N referente ao cultivo do milho, levando em conta os tratamentos de cobertura nitrogenada N60, N150 e N396 (Figura 10).

As entradas totais de N no sistema foram estimadas em 303, 395 e 643 kg ha⁻¹ nos tratamentos com as doses N60, N150 e N396, respectivamente. Nessa mesma ordem, as saídas totalizaram 153, 185 e 267 kg ha⁻¹ de N e os estoques residuais após a colheita foram de 149, 163 e 173 kg ha⁻¹ de N. Confrontando-se a diferença de entradas e saídas com os estoques de N residual no sistema, chega-se a valores aproximados de 1, 47 e 203 kg ha⁻¹ do nutriente que não puderam ser contabilizados por meio das variáveis levantadas no presente estudo, constituindo o “saldo de N não detectado” associado a cada nível de adubação nitrogenada em cobertura (Figura 10).

Figura 10 - Estimativa do balanço de nitrogênio (kg ha^{-1}) no cultivo do milho, sob influência de doses do nutriente aplicadas em cobertura (N60, N150 e N396). *Saldo de N não detectado* = $[(I + 2 + 3 + 4 + 5) - (A + B + C + D)] - (I + II)$. Sete Lagoas – MG, 2015.



Fonte: Do autor, 2018.

As saídas de N do sistema corresponderam a, no mínimo, 41% do somatório aportado como crédito. Dessas saídas, 121, 118 e 120 kg ha^{-1} de N foram exportados nos grãos de milho colhidos, correspondendo a cerca de 40, 30 e 19% dos créditos totais associados às doses N60, N150 e N396, respectivamente. O N residual pós-cultivo foi aproximadamente 149, 163 e 173 kg ha^{-1} , respectivamente, nas doses N60, N150 e N396, que corresponde ao percentual de 49, 41 e 27% em relação aos créditos totais de N no sistema. Foi encontrado como N não detectado cerca de 0,6 kg ha^{-1} na menor dose e 203 kg ha^{-1} na maior. Como era de se esperar, os saldos de N não recuperados foram mais elevados nos tratamentos com as maiores doses do nutriente fornecidas em cobertura. Embora não seja possível elucidar completamente a dinâmica e o destino do nitrogênio não quantificado nas avaliações e estimativas utilizadas, algumas hipóteses podem ser elencadas.

Um primeiro aspecto está relacionado à continuidade da emissão de N-N₂O posteriormente ao período de 12 dias de avaliação após a aplicação da ureia em cobertura. Embora isso certamente tenha ocorrido, o período monitorado deve ter permitido capturar boa parte das emissões, considerando as informações do trabalho de Hickman et al., (2014), em que mais de 60% da emissão total de N-N₂O ocorreu nas três primeiras semanas após a adubação nitrogenada em solo da savana africana. Ademais, os níveis dessa forma de perda

foram de magnitude muito inferior aos detectados conforme a estimativa de volatilização de amônia ou pela lixiviação quantificada nos lisímetros (Figura 10).

Um segundo aspecto que deve ser levado em conta para explicar a significativa fração de N não detectado na maior dose (N396) é a provável subestimativa da perda por volatilização de N-NH₃ nesse tratamento. Para fins de cálculo do balanço de N no presente estudo, adotou-se o índice médio de perda de 30% por volatilização de N-NH₃, obtido por Cancellier (2013) ao avaliar aplicações de 100 a 200 kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho num Latossolo Vermelho argiloso de cerrado. Todavia, de acordo com Cantarella (2007), doses mais elevadas e distribuição da ureia em filete acabam resultando em maiores perdas de N-NH₃ sob condições que favorecem alta atividade da urease no solo, como é o caso de áreas conduzidas em plantio direto com mais resíduos vegetais na superfície. Assim sendo, é provável que a real volatilização de N-NH₃ no tratamento N396 tenha sido em quantidade bem acima da estimada.

Por fim, é preciso ponderar que o N-Mineral residual no solo foi medido somente até a profundidade de 60 cm no perfil. Sabe-se que a composição mineralógica oxídica dos latossolos leva à maior abundância de cargas positivas em camadas mais profundas, constituindo um ambiente propício à adsorção e retenção de nitrato (CANTARELLA, 2007; REIN, 2008). Assim, este ambiente subsuperficial pode representar um local de estocagem de N, ao passo que restringe a chance de lixiviação de N-NO₃⁻. Portanto, o nitrato retido em camadas abaixo de 60 cm no perfil pode ter sido o destino de parte importante do N não detectado no presente estudo e não seria um compartimento de perda, visto que sistemas de cultivo envolvendo espécies de sistema radicular robusto e profundo, como é o caso do milheto, podem aproveitá-lo.

O entendimento dos dados expressos na Figura 10 permite afirmar que, devido à existência de expressivos créditos iniciais de N no sistema solo-palhada, a dose de 60 kg ha⁻¹ fornecida em cobertura para o milho já foi suficiente para atender à demanda nutricional da cultura, para a faixa de produtividade alcançada no experimento. Ao mesmo tempo, essa dose relativamente baixa resultou em menores perdas do nutriente para a atmosfera e na água de drenagem, sendo, portanto, melhor ajustada para o manejo do cultivo em questão.

De modo geral, os resultados do balanço corroboram as tendências de destinação proporcional do N entre os compartimentos estudados por Coelho et al. (1991) em solo de cerrado sob preparo convencional em Sete Lagoas – MG, utilizando o método isotópico com fertilizante nitrogenado marcado (¹⁵N) para comparar formas de aplicação superficial e incorporada de 60 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. Em média, 56% do total de N aplicado foi

recuperado pela cultura do milho com produtividade de 5.491 kg ha⁻¹ de matéria seca de grãos, 23% ficou retido na camada de 0-90 cm do solo, 4% foi perdido por lixiviação e 15% não foram detectados no sistema.

Nas condições do presente estudo, as doses acima de 60 kg ha⁻¹ de N não promoveram melhoria significativa do estado nutricional nem ganhos de produtividade do milho, mas repercutiram no aumento das perdas do nutriente no sistema. Em termos quantitativos, a lixiviação de amônio e de nitrato parece ser um problema proporcionalmente menos acentuado do que as emissões de formas nitrogenadas para a atmosfera, considerando-se a utilização da ureia comum na adubação do milho em Latossolo Vermelho distrófico argiloso.

O solo utilizado apresenta limitada capacidade de estocagem de N-Mineral, de modo que, no manejo agrônômico, deve-se atentar para não incorrer em aplicação de N em quantidades que extrapolem a demanda das culturas e as condições de ciclagem do sistema. Excedentes nas adubações implicarão em redução da eficiência de uso do fertilizante nitrogenado, menor retorno econômico e maiores riscos ambientais.

4 CONCLUSÕES

Doses crescentes de N em cobertura implicam em aumento nas perdas por emissão de óxido nitroso e por lixiviação de amônio e nitrato, mas também incrementam os estoques dessas duas últimas formas no solo. Porém, a ocorrência de tais efeitos não é estritamente proporcional à variação na quantidade fornecida do nutriente.

Aplicações a partir de 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura promovem respostas similares quanto à acumulação de N pelo milho e à produtividade de grãos em condições de maior oferta do nutriente, decorrentes do histórico de fertilidade do solo e do uso anterior de culturas recicladoras.

Na estimativa do balanço de N com a menor dose em cobertura (60 kg ha⁻¹ de N), 40% dos créditos do nutriente no sistema são exportados nos grãos colhidos, 6% correspondem a perdas por volatilização e lixiviação, 49% ficam como estoque residual e 0,2% restam como N não detectado. O aumento da dose na adubação tem reflexo principalmente na fração não detectada.

Excedentes de N na adubação devem ser evitados em ambiente com expressivo potencial de crédito de disponibilidade de cultivos antecessores, pois o sistema apresenta capacidade limitada de estocagem do nutriente, predispondo a perdas que reduzem a eficiência de uso do fertilizante e podem levar a prejuízos econômico e ambiental.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, C.; FRANTZ, J.; BUGBEE, B. Macro and micronutrient release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Madison, v. 76, n.1 p.76-88, jan.2013.
- ALMEIDA, R.F. et al. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: uma revisão. **Revista Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v.8. n.2. p.441-461, ago. 2015.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Nitrato no solo com a aplicação de dejetos líquidos de suínos no milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2101-2111, out. 2008.
- ALVES, B.J.R. et al. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 46, p. 129-135, fev. 2012.
- ALVES, B.J.R. et al. **Emissões do óxido nitroso de solos pelo uso de fertilizantes nitrogenados em áreas agrícolas**. Seropédica, RJ, junho, 2010 (comunicado técnico Embrapa 126).
- ANDRADE, C.L.T., ALVARENGA, R.C. Sistema para monitoramento integrado da dinâmica de água e solutos no solo - SISDINA. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 2000. CD-ROM.
- ANDRADE, A.C. et al. Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, p.1643-1651, 2003.
- BALL, B. C. et al. Seasonal nitrous oxide emissions from field soils under reduced tillage, compost application or organic farming. **Agriculture Ecosystem**, Environ, v. 189, n.54, p. 171-180, mar, 2014.
- BENDER, R. R. et al. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105. n.1, p. 161-170, jan. 2013.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Norma de qualidade da água para consumo humano. Portaria MS nº518, de 25 de março de 2004. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 mar.2004. Seção 1, p.266.
- BRASIL. **Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. p.520.
- BOUWMAN, A. F. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 46, n. 1, p. 53-70, abr. 1996.

BREDEMEIER, C.; MUNDSDOCK, C.M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, jan. 2000.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NARDOTO, G. B.; PINTO, A. S. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, p. 655-671, jan. 2012.

BUTTERBACH-BAHL, K. et al. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, London, v. 368, n. 1621, p. 201-231, mar. 2013.

CANCELLIER, E.L. **Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013. 75p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

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**. 2005. 199p. Tese (Doutorado em Ecologia) Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

CARVALHO, A. M. et al. Emissão de óxido de nitrogênio associada à aplicação de uréia sob plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.4, 679-685, abr. 2006.

COELHO, A.M. et al. Balanço de nitrogênio (¹⁵N) em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 15, n. 2, p.187-193, 1991.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Séries históricas relativas às safras. Disponível em <<http://www.conab.gov.br/contéudos.php>>. Acesso em: abril de 2015.

CONEN, F.; SMITH, K. A. An explanation of linear increases in gas concentration under closed chambers used to measure gas exchange between soil and the atmosphere. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 51, n. 1, p. 111-117, mar. 2000.

CRUVINEL, Ê. B. F. et al. Soil emissions of NO, N₂O and CO₂ from croplands in the savanna region of central Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.144, n. 1, p.29-40, jan. 2011.

DUSENBURY, M. P. et al. Nitrous oxide emissions from a northern great plains soil as influenced by nitrogen management and cropping systems. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 37, n.2, p.542-550, jan.2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. Ed. Brasília, 2013. 353 p.

- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 183 p.
- FANCELLI, A. L. **Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo**. BORÉM, A.; GALVÃO, JCC; PIMENTEL, MA. Milho: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFV, p. 50-76, 2015.
- FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. (Comunicado Técnico, 69).
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, dez. 2011.
- FOUNTOURA, S.M.V.; BAYER, C. **Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro-sul do Paraná**. Guarapuava, PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009, 32p.
- GOLLANY, H. T. et al. Nitrogen leaching and denitrification in continuous corn as related to residue management and nitrogen fertilization. **Environmental Management**, New York, v. 33, n. 1, p. 289-298, jan. 2004.
- GOMES, J. et al. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.106, n.106, p.36-44, abr. 2009.
- HAYASHI, K. et al. Cropland soil–plant systems control production and consumption of methane and nitrous oxide and their emissions to the atmosphere. **Soil Science and Plant Nutrition**, London, v. 61, n.1, p. 2–33, jan. 2015.
- HICKMAN, J. E. et al. Nitrous oxide (N₂O) emissions in response to increasing fertilizer addition in maize (*Zea mays* L.) agriculture in western Kenya. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, London, v. 100, n. 2, p.77–187, abr. 2014.
- HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais**. 2014. 160p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- HURTADO, S.M.C. et al. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 688-697, ago. 2010.
- IPCC (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual**. Geneva, 1997.
- JADOSKI, S. O. et al. Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Centro Oeste do Paraná, v.3, n.1, 193-200, jan. 2010.
- JANTALIA, C. P. et al. **Em Busca da Mitigação da Produção de Óxido Nítrico em Sistemas Agrícolas: Avaliação de Práticas Usadas na Produção de Grãos no sul do País**.

- In: ALVES, B.J. R.; URQUIAGA, S.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). Manejo de Sistemas Agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas Emissões de Gases de Efeito Estufa. Porto Alegre: Gênese, v. 1, p. 81-108, 2006.
- JARRELL, W. M; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in agronomy**, v.34, p.197-224, jan.1981.
- LIU, C. et al. Three-year measurements of nitrous oxide emissions from cotton and wheat-maize rotational cropping systems. **Atmospheric Environment**. Madison, v.96, n. 22, p. 201–208, jan. 2014.
- LIVINGSTON, G. P.; HUTCHINSON, G. L. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. **Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water**, 1995. p. 14-51.
- MARTINS, M. R. et al. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.151, n. 56, p. 75 -81, jan. 2015.
- MATTOS JÚNIOR, D.; CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B. Manuseio e conservação de amostras de solo para preservação do nitrogênio inorgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 423-431, dez. 1995.
- MOSIER, A. R. et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1584-1598, abr. 2006.
- PANOSOS, L. A.; RAMOS, D. P.; BRANDÃO, M. Solos do Campo Experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.
- PAVINATO, P. S. et al. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.358-364, abr. 2008.
- PIMENTEL, L.G. et al. Soil N₂O emissions following cover-crop residues application under two soil moisture conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Madison, v. 178, n.4, p. 631–640, mar. 2015.
- RAMBO, L. et al. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.4, p.1278-1287, ago. 2004.
- RAMBO, L. et al. Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrato no solo para o milho. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v.31, n. 25, p.731-738, jan. 2007.
- REIN, T. A. **Surface Chemical Properties and nitrate adsorption of oxisols from the Brazilian savannas**. Thesis (PhD Doctor of Philosophy) - Cornell University, Ithaca, New York. 2008.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. Como a planta de milho se desenvolve. POTAFOS. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 103, p. 1-19, fev. 2003.

ROCHETTE, P. et al. Carbon dioxide and nitrous oxide emissions following fall and spring applications of pig slurry to an agricultural soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.1410-1420, jan. 2004.

SANGOI, L. et al. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p.65-70, mar. 2003.

SIGNOR, D; CERRI C.E.P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, Madison, v.8, n.1, p. 1– 9, feb. 2013.

SILVA, C. A.; VALE, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.1, p. 2461-2471, jan. 2000.

SILVA, D. F. et al. **Análise de Nitrato e Amônio em Solo e Água. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo**, 2010 (Documentos 114).

SILVA, D.R.G. et al. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT -treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 516-523, jun. 2011.

SILVA, D. F. et al. Nitrogen dynamics in soils cultivated with maize and fertilized with pig slurry. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.7, n.1, p. 9-23, 2012.

SILVA, F. L.; PIERANGELI, M.A.P.; MACHADO, R. J. T. Disponibilidade e lixiviação de nitrogênio em dois solos típicos de Pontes e Lacerda, MT, tratados com resíduo ruminal bovino. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34., n. 4, p. 1509-1522, ago. 2013.

SILVA, C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ed. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília. 2009.

SILVA, C. G. M. **Absorção e exportação de macronutrientes em milho transgênico sob dois níveis de investimento em adubação**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Universidade Federal de São João del-Rei, 2016.

SMITH, K. A. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, n. 4, p. 779-791, 2003.

SOARES, J. R. et al. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 44, n. 25 p.423–430, mar. 2015.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHMEN, H. **Análise de solo, planta e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p.