Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

**Interação de nitrogênio e potássio na nutrição, no teor de clorofila e na
atividade da redutase do nitrato em plantas de trigo**

Eloise Mello Viana

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas**

Piracicaba
2007

Eloise Mello Viana
Engenheira Agrônoma

**Interação de nitrogênio e potássio na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da
redutase do nitrato em plantas de trigo**

Orientador:
Prof. Dr. **JORGE DE CASTRO KIEHL**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas**

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Viana, Eloise Mello

Interação de nitrogênio e potássio na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da redutase do nitrato em plantas de trigo / Eloise Mello Viana. - - Piracicaba, 2007.
95 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Clorofila 2. Nitrogênio 3. Nutrição vegetal 4. Potássio 5. Redutase do nitrato 6. Trigo
I. Título

CDD 633.11

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus amados pais, Eloir e Marildes,
Aos meus irmãos, Luciane e Elton,

Incansáveis na dedicação,
Imprescindíveis no apoio,
A razão de todo o meu esforço.

A Jorge Henrique,

Pelo amor, carinho, companheirismo, compreensão e incentivo às
minhas conquistas.

OFEREÇO E DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e por guiar e iluminar o meu caminho.

Ao. Dr. Jorge de Castro Kiehl, Professor Titular da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, do Departamento de Ciência do Solo, pela orientação, confiança e amizade.

Ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, sua comissão de coordenação, seus professores e funcionários, pelas oportunidades, ensinamentos e ajuda.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para o curso de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Francisco Antonio Monteiro, Professor Titular da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, do Departamento de Ciência do Solo, pelos conhecimentos transmitidos, atenção e amizade.

À amiga Ana Carolina F. de Vasconcelos pela companhia diária, carinho e inestimável ajuda na conclusão desta etapa de minha vida.

Aos amigos do curso de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em especial ao Fabiano Daniel de Bona, Adilson de Oliveira Junior, Cristiane Prezzoto Silveira e Freddy Contreras, pelas dicas, amizade e auxílios prestados.

Aos amigos da EMBRAPA Gado de Corte, em especial à Isaura Megumi Naka, Josenilto Cavalcante de Miranda, Sandra Helena Ratier e ao Laucídio de Arruda Moraes pela amizade, carinho e apoio em todos os momentos.

Às amigas Rosely Silva, Elaine Cerqueira, Suane Coutinho, Faiza Cabral e ao amigo Alexsandro Brito, pelo carinho, apoio e cuidado em todos os momentos.

Ao Dr. José Antônio Portella, pesquisador da EMBRAPA Trigo, pelas dicas e auxílio na condução deste trabalho.

À família Tremocoldi pela amizade, auxílios prestados e principalmente por me acolher com tanto carinho.

A todos, que de alguma forma contribuíram para a realização desta etapa de minha vida.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Cultura do Trigo	12
2.2 Nitrogênio no solo e na planta.....	12
2.3 Potássio no solo e na planta.....	15
2.4 Nitrogênio e a cultura do trigo.....	19
2.5 Potássio e a cultura do trigo.....	21
2.6 Relação nitrogênio : potássio.....	22
2.7 Estimativa do teor de clorofila	26
2.8 Redutase do nitrato	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Local e espécie vegetal utilizada	31
3.2 Caracterização do solo utilizado no experimento.....	31
3.3 Tratamentos e delineamento experimental	32
3.4 Instalação e desenvolvimento do experimento.....	32
3.5 Valor SPAD.....	33
3.6 Atividade da redutase do nitrato.....	34
3.7 Concentração de macronutrientes.....	35
3.8 Análises estatísticas	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Produção de massa seca da parte aérea	36
4.2 Concentração de macronutrientes na parte aérea	39
4.2.1 Nitrogênio.....	39
4.2.2 Potássio.....	41
4.2.3 Fósforo.....	43
4.2.4 Cálcio.....	45

4.2.5 Magnésio	46
4.2.6 Enxofre	49
4.3 Produção de massa seca da espiga.....	52
4.4 Concentração de macronutrientes na espiga.....	54
4.4.1 Nitrogênio	54
4.4.2 Potássio	55
4.5 Produção de massa seca de raiz.....	56
4.6 Concentração de macronutrientes na massa seca de raiz	58
4.6.1 Nitrogênio	58
4.6.2 Potássio	60
4.6.3 Cálcio.....	62
4.6.4 Magnésio	63
4.6.5 Enxofre	65
4.7 Acúmulo de nitrogênio e potássio nos componentes da planta	66
4.7.1 Acúmulo de nitrogênio nas folhas	66
4.7.2 Acúmulo de potássio nas folhas	67
4.7.3 Acúmulo de nitrogênio nas espigas.....	68
4.7.4 Acúmulo de potássio nas espigas	69
4.7.5 Acúmulo de nitrogênio nas raízes	70
4.7.6 Acúmulo de potássio nas raízes.....	70
4.8 Estimativa do teor de clorofila através do valor SPAD	71
4.9 Atividade da enzima redutase do nitrato	74
5 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	79

RESUMO

Interação de nitrogênio e potássio na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da redutase do nitrato em plantas de trigo

O conhecimento do comportamento vegetal quanto ao uso de nutrientes permite manusear ou modificar o sistema de cultivo para melhorar a eficiência na utilização de nitrogênio. O fornecimento de potássio para as plantas estimula o aproveitamento do nitrogênio, possibilitando que sua absorção, assimilação e, conseqüentemente, a produtividade sejam aumentadas. Com base nestes fatos, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de combinações de doses de nitrogênio e de potássio na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da enzima redutase do nitrato em plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.). O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba-SP, utilizando-se vasos de três litros onde foram acondicionadas amostras da camada 0-20 cm de um Argissolo Vermelho Amarelo Abrúptico. Utilizou-se esquema fatorial 5^2 fracionado, com combinações de cinco doses de nitrogênio (0; 70; 140; 210 e 280 mg dm⁻³) e de cinco doses de potássio (0; 50; 100; 150 e 200 mg dm⁻³), as quais foram distribuídas segundo delineamento experimental de blocos aleatorizados, com quatro repetições. As leituras SPAD das folhas do terço-médio das plantas de trigo foram realizadas 30 dias após a semeadura. Aos setenta e nove dias após a semeadura foi realizada determinação da atividade da enzima redutase do nitrato. Aos 80 dias após a semeadura, as plantas foram colhidas, separada em parte aérea, espiga e raízes, secadas, pesadas e submetidas à determinação da concentração de nutrientes e acúmulo de nitrogênio e potássio. Os resultados foram analisados por meio do programa estatístico SAS e mostraram que o equilíbrio entre o fornecimento de nitrogênio e potássio foi essencial para o crescimento adequado das plantas de trigo. Ficou evidente que a combinação entre as doses de nitrogênio e de potássio interagiu positivamente na produção de fitomassa e na concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e enxofre na parte aérea das plantas; o nitrogênio foi determinante para a concentração de magnésio no tecido vegetal. A interação entre as doses de nitrogênio e de potássio influenciou positivamente na produção de fitomassa e na concentração de nitrogênio na espiga. A concentração de potássio na espiga dependeu apenas do fornecimento das doses de nitrogênio. A produção de fitomassa das raízes foi incrementada com o fornecimento das doses de nitrogênio e de potássio, sendo suas concentrações de nitrogênio, magnésio e de enxofre influenciadas pelo suprimento de nitrogênio. A concentração de potássio nas raízes diminuiu e a de cálcio aumentou com as doses de nitrogênio, conforme equação de segundo grau. O fornecimento de potássio promoveu decréscimos lineares na concentração de magnésio na parte aérea e nas raízes das plantas de trigo. O nitrogênio aumentou a atividade da redutase do nitrato até as doses intermediárias, diminuindo nas doses elevadas. O teor de clorofila das folhas do terço-médio da planta foi influenciado pela interação entre as doses de nitrogênio e potássio e refletiu diretamente na produtividade de fitomassa da parte aérea e de espigas, assim como no acúmulo de nitrogênio pelas plantas de trigo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.; Redutase do nitrato; Leituras SPAD

ABSTRACT

Interaction of nitrogen and potassium in wheat nutrition, chlorophyll content, and nitrate activity reductase

The knowledge about plant nutrition allows managing crop systems in order to improve the nitrogen use efficiency. Supplying potassium to plants stimulates the efficiency use of nitrogen through plant uptake and assimilation, consequently increasing crop yields. Based on these facts, the aim of this study was to evaluate the effect of combined rates of nitrogen and potassium on the nutrition, chlorophyll content, and nitrate reductase activity in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants. The experiment was conducted in a greenhouse of the Soil Science Department of the ESALQ/USP in Piracicaba State of São Paulo, Brazil. Three-liter pots were filled with 0-20 cm depth samples of Arenic Hapludult. A fractionated 5² factorial was used, with combinations of five nitrogen rates (0; 70; 140; 210 e 280 mg dm⁻³) and five potassium rates (0; 50; 100; 150 e 200 mg dm⁻³), which were set in a randomized block design with four replications. Thirty days after seeding SPAD values readings were taken on the leaves. Nitrate reductase activity was determined seventy-nine days after seeding and one day later plants were harvested and separated in shoot, roots, and ears. These plant materials were weighted and submitted to nutrient content and accumulation of nitrogen and potassium. Statistical analyses were performed by means of SAS software. Results presented that the balance between nitrogen and potassium supplies was essential to adequate wheat plant growth. It was clear that the combination of nitrogen and potassium rates had a positive influence on wheat dry mass yield as well as on nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and sulphur contents in plant shoot. Nitrogen was essential to maintain adequate magnesium content in plant tissues. The interaction between nitrogen and potassium rates was important for plant yield and ear nitrogen content. Potassium content in the ears was affected only by nitrogen rates. Root dry matter yield increased with rates of nitrogen and potassium. Nitrogen, magnesium and sulphur contents in the roots were influenced only by nitrogen application. Potassium concentration in the roots reduced and calcium concentration increased with nitrogen rates according to a quadratic equation. Potassium supply caused linear decreases in magnesium content of shoots and roots. Nitrogen increased nitrate reductase activity up to the medium rates of application and reduced for the highest rates. Chlorophyll content in the leaves was influenced by the interaction between nitrogen and potassium rates, reflecting on the dry matter yield of plant shoot and ears, as well as on nitrogen accumulation in the wheat plants.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; Nitrate reductase; SPAD measurements

1 INTRODUÇÃO

O trigo é um dos principais alimentos da humanidade e ocupa 20% da área cultivada do mundo. Atualmente, o Brasil consome cerca de 10 milhões de toneladas de trigo por ano e altos rendimentos são obtidos quando se utilizam conjuntos de tecnologias próprias para o seu cultivo. A adubação é um procedimento indispensável para a obtenção de rendimentos máximos de trigo no Brasil (LANTMANN et al., 2005).

O suprimento de nutrientes para as plantas e a adequada proporção entre eles são de fundamental importância na produtividade e qualidade do cultivo do trigo. A disponibilidade do nitrogênio é um dos fatores mais importantes nos processos de crescimento e de desenvolvimento da planta, pois apresenta-se como o nutriente de maior impacto na produção e na qualidade de cereais.

Após o nitrogênio, o potássio é o nutriente absorvido em maior quantidade pelas plantas (MARSCHNER, 1995). O potássio é um elemento essencial para todos os organismos vivos, sendo o cátion mais importante nos processos fisiológicos das plantas, não somente pela sua concentração nos tecidos vegetais, mas também pelas suas funções bioquímicas (MENGEL; KIRKBY, 2001).

A interação entre íons pode ocorrer em diferentes momentos e locais quando se considera o sistema solo-planta. Assim, poderá ocorrer no solo, considerando-se as diversas formas de equilíbrio e de transporte do íon, na rizosfera, nas membranas e dentro da planta (ROSOLEM, 2005). Dessa forma, toda a dinâmica do nutriente na planta e no solo deve ser conhecida, a fim de se entender melhor as interações e aperfeiçoar o uso dos fertilizantes nitrogenados.

Dada a sua importância e a alta mobilidade do nitrogênio no solo, esse nutriente tem sido intensamente estudado no sentido de maximizar a eficiência do seu uso. Para tanto, tem-se procurado diminuir as perdas do nitrogênio do solo, bem como melhorar a sua absorção e metabolização no interior da planta (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2000).

Em média, a eficiência de utilização do nitrogênio pelas plantas para produção de cereais (trigo, milho, arroz, cevada, sorgo, milheto, aveia e centeio) é de aproximadamente 33% (RAUN; JOHNSON, 1999). Buscando ferramentas e alternativas para maximizar o uso de fertilizantes, principalmente o nitrogenado, o monitoramento do teor de clorofila e da assimilação do

nitrogênio por meio da avaliação da atividade da enzima redutase do nitrato têm se mostrado como índices de alta precisão para o manejo da fertilização nitrogenada.

O desenvolvimento do medidor de clorofila para realização de leituras instantâneas diretamente na folha, sem haver necessidade de sua destruição, surge como nova ferramenta para avaliação do nível de nitrogênio nos cereais (ARGENTA et al., 2001). Muitos estudos têm sido conduzidos para explorar o potencial dessa técnica em indicar o status do nitrogênio na cultura (HERRMANN; TAUBE, 2005). As leituras efetuadas por este equipamento correspondem ao teor relativo de clorofila presente na folha da planta e que é calculado com base na quantidade de luz transmitida pela folha, em dois comprimentos de ondas, com diferentes absorbâncias da clorofila (ARGENTA et al., 1999).

A redutase do nitrato foi considerada enzima chave na regulação do metabolismo do nitrogênio nos anos 70 (VENKATESAN; GANAPATHY, 2004). Por causa desse seu papel regulador, a atividade da redutase do nitrato poderia estar relacionada, indiretamente, com a produtividade das culturas. Isso com base na pressuposição de que plantas com alta atividade da redutase do nitrato teriam maior capacidade de assimilar o nitrato disponível e, em consequência, maior capacidade em responder à adubação nitrogenada.

Dentre vários processos nutricionais envolvidos, o nitrogênio e o potássio são responsáveis pela produção e qualidade do trigo. Determinadas combinações de doses de nitrogênio e de potássio na adubação exercem influência sobre a nutrição, crescimento e desenvolvimento das plantas, e a associação desses nutrientes favorece a atividade da redutase do nitrato e o teor de clorofila das plantas.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar o efeito de combinações de doses de nitrogênio e de potássio no desenvolvimento, na nutrição, no teor de clorofila e na atividade da enzima redutase do nitrato de plantas de trigo cultivadas em casa de vegetação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura do Trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é historicamente um dos cereais de maior importância na alimentação humana. É uma planta originária de clima frio. Porém, com a intervenção do homem nos processos de cultivo e a adaptação de novas variedades, o trigo passou a ser cultivado sob os mais diversos climas.

O trigo ocupa o primeiro lugar em volume de produção mundial. No Brasil, a produção anual oscila entre 5 e 6 milhões de toneladas. É cultivado nas regiões Sul, Sudeste (MG e SP) e Centro-oeste (MS, GO e DF). O consumo anual no país, por outro lado, tem se mantido em torno de 10 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2007). De acordo com os pesquisadores da Embrapa Trigo, o Brasil oferece área e condições de ser auto-suficiente na produção de trigo. Para isso, seria necessário uma política agrícola adequada, pois a triticultura brasileira ainda enfrenta alguns desafios, entre eles, o problema da comercialização do cereal (EMBRAPA, 2007).

Na Região Sul, o cultivo de trigo constitui uma das principais fontes de renda da produção agrícola no inverno, sendo fundamental no sistema plantio direto para a cobertura vegetal do solo e para a produção de palha que cobrirá o solo durante o cultivo de culturas de verão (WIETHOLTER, 2004).

Altos rendimentos de trigo (da ordem de 4.000 kg ha^{-1}) são obtidos quando se usa um conjunto de tecnologias próprias e as condições climáticas são favoráveis. O trigo prefere clima mesotérmico, tendendo a temperado, podendo também ser cultivado nas regiões subtropicais, desde que a temperatura elevada seja compensada com aumento em altitude. Por ocasião do florescimento, o trigo é muito sensível à temperatura elevada, a qual pode ocasionar distúrbios fisiológicos durante o enchimento do grão (LANTMANN et al., 2005).

2.2 Nitrogênio no solo e na planta

O nitrogênio é considerado um dos nutrientes que causam maior impacto no desenvolvimento e produtividade, conseqüentemente, aumento nos índices de qualidade dos produtos agrícolas. Esse nutriente é indispensável para a formação de proteínas, núcleo-proteínas

e outros compostos como aminas, aminoácidos e polipeptídeos (MAGALHÃES, 1979), conseqüentemente, é indispensável para a produção de cereais de alta qualidade.

A adição do nitrogênio ao solo pode ser como fertilizantes minerais e orgânicos, por meio da água da chuva (as descargas elétricas combinam o N_2 e o O_2 presentes na atmosfera) e pela fixação biológica (MALAVOLTA, 2006). Esse nutriente está sujeito a um grande número de processos, principalmente as transformações de formas orgânicas em inorgânicas e vice-versa, podendo resultar em ganhos ou perdas do sistema como um todo (RAIJ, 1991; HAVLIN et al., 2005).

A mineralização do nitrogênio orgânico no solo envolve dois processos microbiológicos distintos: amonificação e nitrificação. A amonificação converte proteínas e aminoácidos em amônio, enquanto a nitrificação converte este em nitrato, principal forma de nitrogênio absorvida pelas plantas (CANTARELLA et. al., 1992).

Segundo Monteiro (2000), a velocidade do processo de mineralização pode variar com o tempo e, principalmente, com a natureza do resíduo orgânico em decomposição, além de depender da atividade microbiana do solo.

Em áreas tropicais extensivamente manejadas, sem adição de fertilizantes nitrogenados, a disponibilidade do nitrogênio depende diretamente da mineralização desse nutriente presente nos resíduos orgânicos, essa dependência pode resultar em uma imobilização do nutriente, acarretando deficiências e, conseqüentemente, queda de produtividade.

A preferência na absorção de NH_4^+ ou NO_3^- pelas plantas depende da idade da planta, do ambiente e de outros fatores. A taxa de absorção de NO_3^- é usualmente alta, causando aumento no pH da rizosfera. Quando as plantas absorvem altos níveis de NO_3^- , ocorre aumento na excreção de ânions HCO_3^- , OH^- e ânions orgânicos pelas raízes e na absorção dos cátions Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ . A absorção de NH_4^+ , ao contrário, diminui o pH da rizosfera porque reduz a absorção de Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ e aumenta a dos ânions $H_2PO_4^-$, SO_4^{-2} e Cl^- . Ocorre devido à exsudação de H^+ pelas raízes para manter a eletroneutralidade ou o balanço de cargas dentro da planta (HAVLIN et al., 2005). Assim, a acidificação é um dos fatores que podem afetar a disponibilidade de ambas as formas de nitrogênio no solo e a atividade biológica na zona radicular.

O nitrogênio, após ser absorvido por fluxo de massa pelas raízes das plantas, é reduzido à forma amoniacal e transformado em compostos orgânicos da planta, formando ácido glutâmico e

outros aminoácidos; estes compostos são as unidades básicas para a formação de proteínas, as quais têm importantes papéis funcionais e estruturais nas plantas (MARSCHNER, 1995).

A redistribuição do nitrogênio é facilmente realizada na planta, via floema e, conseqüentemente, os sintomas de deficiência desse nutriente aparecem primeiramente nas folhas mais velhas (MENGEL; KIRKBY, 2001). O fornecimento adequado do nitrogênio pelo solo ou pela adição de adubo, como regra, melhora a qualidade dos produtos agrícolas, o excesso, porém, pode ser prejudicial (MALAVOLTA, 2006).

O nitrogênio promove alterações na morfologia das plantas e em condições de alto suprimento desse nutriente, ocorre aumento na área foliar; como conseqüência, a curvatura das folhas é ampliada de modo a interferir na interceptação de luz (MARSCHNER, 1995). Por ser o nutriente responsável pela vegetação, o suprimento de nitrogênio reflete no índice de área foliar, na produção de gemas vegetativas, no perfilhamento e no teor de proteína dos grãos (MALAVOLTA, 2006).

Alterações nos componentes de produção e morfogênese do capim-Aruana em resposta à aplicação do nitrogênio foram estudadas por Lavres Junior et al. (2004). Relataram que as doses de nitrogênio promoveram incrementos na área foliar do capim, por ocasião dos dois cortes efetuados.

Santos Junior e Monteiro (2003), analisando a dinâmica de crescimento e nutrição do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio, observaram que a área foliar foi significativamente alterada pelas doses de nitrogênio.

Por ser um nutriente com elevado dinamismo no sistema solo-planta, o manejo adequado do nitrogênio é conhecido como um dos mais difíceis (SANTOS et al., 2003); portanto, é necessário que este nutriente seja fornecido à planta em locais e épocas adequadas.

Harper et al. (1987), estudando o ciclo do nitrogênio, concluíram que aproximadamente 11% do nitrogênio aplicado foram perdidos do sistema solo-planta no período de 20 dias após a fertilização.

O custo crescente dos fertilizantes nitrogenados, aliado às elevadas perdas demanda práticas de manejo que resultem em alta eficiência de utilização do nitrogênio pelas culturas. No manejo de nitrogênio em sistemas agrícolas deve-se considerar também os riscos ao ambiente, uma vez que este nutriente está sujeito a elevadas perdas por erosão, lixiviação, desnitrificação e volatilização. Desta forma, o manejo ideal da adubação nitrogenada deve ser definido como

sendo aquele que permite satisfazer a necessidade da cultura, mas com o mínimo de risco ao ambiente (FERNANDES, 2006).

Assim, as perdas de N-fertilizante do sistema solo-planta precisam ser identificadas e conhecidas para permitir que sejam delineadas estratégias visando aumentar a eficiência de uso e minimizar seus efeitos sobre o ambiente.

2.3 Potássio no solo e na planta

O potássio no solo é usualmente distinguido nas formas: potássio na solução do solo; potássio trocável, que representa aquele retido nas cargas elétricas negativas dos colóides; o potássio presente na rede cristalina de minerais primários, como micas e feldspatos, e secundários, como illita, bem como ao potássio fixado nas entre camadas de argilominerais do tipo 2:1 expansivos como a vermiculita e a esmectita (RAIJ, 1991; SPARKS, 2000; CURI et al., 2005).

O potássio trocável é a forma de maior velocidade de liberação, pois envolve uma simples reação de troca da superfície dos colóides (NACHTIGALL; VAHL, 1991b). O potássio nas entre camadas das argilas 2:1 é liberado com maior dificuldade, pois depende de várias reações de troca, da expansão de argilas e da difusão do elemento de posições entre as camadas estruturais de argila até a superfície externa (REICHENBACH, 1972). O potássio também pode ser liberado das camadas dos minerais 2:1 pela dissolução, particularmente promovida pela acidificação da rizosfera, devido à excreção de H^+ pelas raízes das plantas (SINGH; GOULDING, 1997).

A disponibilidade de potássio parece ser controlada por alguns fatores físico-químicos, que determinam o equilíbrio entre o potássio da solução do solo, e potássio associado como íon trocável na superfície das camadas internas dos minerais 2:1 (BLAKE et al., 1999).

As plantas absorvem o potássio da solução, a qual é tamponada pelas formas trocáveis, que são repostas pelas não-trocáveis e estruturais (CURI et al., 2005). Essas formas não-trocáveis e estruturais são formas de reservas para a planta, enquanto a trocável e da solução são formas prontamente disponíveis.

Significativas reservas de potássio podem acumular nos solos e serem mantidas pela fertilização (BLAKE et al., 1999) e manejo correto. Essas reservas podem manter o potássio

disponível na solução do solo por anos, promovendo maior disponibilidade deste nutriente para as plantas.

A retenção do potássio no solo e o acúmulo de resíduos como reservas são dependentes da composição física do solo e do fator ambiente que influencia a adsorção e a liberação do potássio, assim como a sua lixiviação no perfil. A absorção de potássio pelas raízes das plantas é um importante papel para o controle, equilíbrio da carga e disponibilidade de potássio devido à diminuição da concentração deste nutriente na rizosfera e controle da carga liberada. Além disso, a estrutura do solo, o tamanho das partículas dos minerais, a atividade biológica e os complexos de ácidos orgânicos e cátions inorgânicos na solução do solo são aspectos que afetam a liberação de potássio da superfície dos minerais (SINGH e GOULDING, 1997).

Segundo Reitemeier (1951), apud Prezotti e Defelipo (1987), os solos com elevado teor de potássio diferem no poder de suprimento do nutriente às plantas em razão desse elemento encontrar-se em diferentes formas, como as descritas no início, muitas das quais não disponíveis para a planta. Nachtigall e Vahl (1991b) relataram alta correlação entre o potássio não-trocável e o potássio absorvido pelas plantas em cultivos sucessivos de milho e azevém, tendo havido baixa ou nenhuma resposta à adubação potássica. Em outro exemplo, a ausência de resposta do arroz irrigado à adubação potássica é explicada pela presença de minerais primários (mica e feldspatos) e secundários (esmectita e esmectita com hidróxi-Al nas entre camadas) que contêm potássio nas frações areia, silte e argila de Planossolos, Gleissolos e Chernossolos (CASTILHOS et al., 2002).

Em solos altamente intemperizados, comuns nos trópicos, a forma trocável tem sido utilizada para indicar a disponibilidade de potássio, uma vez que é insignificante a contribuição das formas não-trocáveis (RAIJ, 1981). Esse parece ser o caso da maioria dos solos brasileiros, onde a caulinita, gibsitita e óxidos de ferro, como hematita e goetita, predominam na fração argila, e o quartzo na fração areia contendo assim, pequena quantidade de minerais fornecedores de potássio como os minerais primários e secundários.

Os índices de disponibilidade de potássio são controlados pelo íon trocável, pela liberação do potássio não-trocável das camadas internas dos minerais e pela sua fixação; porém, a sua disponibilização depende também da forma na qual é aplicado (BLAKE et al., 1999).

Dentre os elementos fornecidos pelo solo, o potássio é o segundo macronutriente em teor contido nas plantas, destacando assim, a necessidade de monitoramento desse nutriente em várias partes da planta e adequado manejo na adubação.

A exigência de potássio para o ótimo crescimento das plantas varia entre 20 e 50 g kg⁻¹ de massa seca do vegetal (MARSCHNER, 1995). O potássio é geralmente o cátion mais abundante em todas as culturas. Está presente nos tecidos, na maioria das vezes em formas solúveis em água, sendo considerado o mais móvel dos nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera e particularmente, na planta (MALAVOLTA, 2005).

O potássio participa da translocação dos carboidratos sintetizados no processo fotossintético, da síntese protéica e da ativação enzimática, sendo que em casos de deficiência algumas plantas passam a acumular carboidratos solúveis e reduzem o acúmulo de amido e compostos nitrogenados. É absorvido na forma de K⁺, não sofrendo alterações em sua forma no interior das plantas (MARSCHNER, 1995).

Mello et al. (1989) relataram que o potássio não faz parte de compostos orgânicos estruturais da planta. Nos vegetais, faz-se presente sob a forma iônica no suco celular e na seiva, ou então, encontra-se adsorvido às proteínas do protoplasma, sendo um elemento mineral muito móvel nos tecidos. Devido a essa mobilidade, o potássio é facilmente perdido pelas folhas e pelas raízes, e o conteúdo deste nutriente no vegetal diminui com o avanço da idade da planta.

Meio e genótipo influenciam a absorção de potássio, isto é, vários fatores internos e externos podem fazer com que as raízes e folhas absorvam quantidades maiores ou menores de potássio. Os fatores internos são: concentração, carboidratos, crescimento e morfologia da raiz, capacidade de absorver água e variedade. Os fatores externos são: concentração de potássio, cálcio, magnésio e sódio na solução, tensão de O₂, temperatura e umidade (MALAVOLTA, 2005).

Embora a absorção de nutrientes seja governada pelas interações que ocorrem na interface de solo e raiz, o transporte de potássio do solo para as raízes ocorre principalmente via difusão na solução do solo, um processo conduzido pelo gradiente de concentração do K⁺ entre a superfície da raiz e o solo adjacente (BARBER, 1985; HENSINGER, 1998; ZENG; BROWN, 2000).

Silva et al. (1995), em estudos com sete doses de potássio (0; 9,75; 39; 78; 156; 234 e 312 mg L⁻¹) aplicadas no capim-Tanzânia, verificaram respostas positivas às doses desse nutriente para a produção de massa seca de lâminas de folhas maduras, de lâminas de folhas recém-expandidas, de colmos mais bainhas, da parte aérea e também para o perfilhamento do capim.

Mattos (1997) conduziu dois experimentos em casa-de-vegetação com solução nutritiva, avaliou o estado nutricional de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu submetidas a doses de potássio. Verificou que o incremento de potássio na solução proporcionou aumentos na produção de massa seca da parte aérea, das raízes, no perfilhamento e na concentração de potássio nos componentes da parte aérea e nas raízes das duas espécies.

Andreotti et al. (2001), avaliando o desenvolvimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica, verificaram que a altura de plantas de milho e a produção de grãos foram influenciadas pela elevação do teor de potássio no solo até a adição da dose 60 mg kg^{-1} de potássio.

Conforme apontam Stromberger et al. (1994), dentre as várias funções na planta, o potássio é responsável pela ativação enzimática no processo de transporte do nitrogênio e, conseqüentemente, crescimento e desenvolvimento celular, o que confere aumento de tecidos na planta. Em experimentos com milho, verificou-se que o diâmetro do colmo foi aumentado com a adubação potássica, tornando as plantas mais resistentes ao acamamento e ao quebramento (KARLEN et al., 1987).

Gramíneas forrageiras deficientes em potássio apresentam colmos finos, raquíticos e pouco resistentes ao acamamento; as folhas são pouco desenvolvidas e em fases mais avançadas de deficiência ocorre a clorose e posterior necrose nas pontas e nas margens, afetando a produtividade. Rajj (1991) enfatiza que as plantas em condições de carência deste nutriente apresentam turgidez reduzida, e sob deficiência de água tornam-se flácidas, sendo pouco resistentes à seca e mais susceptíveis ao ataque de fungos.

O suprimento adequado de potássio confere ao trigo maior resistência ao acamamento por dois motivos: maior formação de esclerênquima (tecido lenhoso de suporte) nas paredes celulares do colmo, tornando-as mais resistentes à ruptura; e maior desenvolvimento de raízes, aumentando a fixação da planta ao solo. Além disso, a deficiência de potássio em plantas de trigo ocasiona acamamento, doenças e baixas produtividades. Conforme Malavolta (2006), a deficiência de potássio em cereais apresenta ainda chochamento de grãos devido à senescência precoce.

Com relação ao suprimento de potássio para as plantas, deve-se salientar, porém, que se a aplicação de potássio no solo for elevada e contínua, poderá muitas vezes ocorrer o "consumo de luxo", interferindo assim na absorção e disponibilidade fisiológica de outros nutrientes para as plantas.

2.4 Nitrogênio e a cultura do trigo

O nitrogênio tem grande importância para a cultura do trigo devido à sua participação na constituição de substâncias determinantes da qualidade e no desenvolvimento de funções metabólicas essenciais, tais como a síntese protéica (VIEIRA et al., 1995). O nitrogênio influencia o rendimento de grãos, que é determinado principalmente pelo número de espigas por unidade de área, número de grãos por espigas e massa de grãos (MARCHETTI et al., 2001).

A disponibilidade de nitrogênio, entre outros fatores, é fundamental para a determinação dos seguintes componentes: rendimento de grãos, número de espigas por área, número de grãos por espigas, teor de proteína nos grãos e massa de grãos. Além disso, a deficiência de nitrogênio pode comprometer os processos de crescimento e reprodução das plantas (PÖTTKER; ROMAN, 1998).

As exigências por nitrogênio nos estádios iniciais de desenvolvimento das culturas de milho e trigo, apesar de serem pequenas, são importantes para promover rápido desenvolvimento inicial e definir o potencial produtivo dessas culturas (FANCELLI; DOURADO NETO, 1996).

Pöttker e Roman (1994), estudando o efeito de doses de nitrogênio no rendimento de grãos de milho em sucessão a diferentes culturas de cobertura, verificaram aumento no teor de nitrogênio nos grãos com aumento das doses desse nutriente.

Longnecker et al. (1993), trabalhando com dois cultivares de trigo, verificaram que a concentração de nitrogênio nos dois cultivares aumentou com o incremento do nitrogênio no solo. Coelho et al. (1998) conduziram experimento com trigo durante dois anos, utilizando doses de nitrogênio (30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹) em cobertura e verificaram efeito positivo das doses desse nutriente na altura de plantas e no número de espigas por metro quadrado no segundo ano de cultivo.

O alongamento do caule e, conseqüentemente, a altura de plantas em cereais é influenciada pela aplicação de doses elevadas de nitrogênio, o qual aumenta a produção de fitohormônios promotores de crescimento e desenvolvimento, responsáveis pelos processos de divisão celular (MARSCHNER, 1995).

Cossey et al. (2002), estudando as relações de perdas de amônio e nitrato nas plantas de trigo, verificaram que a produtividade de grãos e massa seca da parte aérea tiveram significativo aumento com a fertilização nitrogenada em vários anos de estudo.

Marchetti et al. (2001), avaliando o efeito da adubação nitrogenada nos rendimentos de massa seca e grãos das espigas em duas espécies de trigo, verificaram que a adição de nitrogênio aumentou o rendimento de massa seca e o número de espigas para as espécies estudadas. Walley et al. (2002) observaram que há significativa relação entre produtividade de grãos de trigo, acúmulo de nitrogênio na cultura e produtividade de massa verde.

Debaeke et al. (1996) relatam que, com a adição de nitrogênio na solução do solo, os teores de proteína dos grãos de trigo aumentaram significativamente, diminuindo o ataque de fungos nos grãos. Tal comportamento deve-se à melhor nutrição de toda a planta, evitando danos e possíveis entradas de patógenos.

Trabalhos realizados com o intuito de avaliar o teor de proteína dos grãos de trigo em diferentes épocas de fornecimento do nitrogênio, mostraram que a maior produção e o maior teor de proteína nos grãos foram encontrados quando o nitrogênio foi fornecido na época do emborrachamento (DIDONET, 1994; CUNIBERTI, 1996; YANO et al., 2005). Entretanto, Da Ros et al. (2003) verificaram que diferentes épocas de aplicações de nitrogênio não influenciaram a produção de massa seca, acúmulo de nitrogênio, teor de nitrogênio e produtividade de grãos das culturas de milho e trigo.

Inúmeros trabalhos têm sido realizados para verificar a resposta do trigo ao nitrogênio com o uso de diversas fontes, doses, métodos e épocas de aplicação (OLIVEIRA et al., 1981; PÖTTKER et al., 1984; NUTTALL; MALHI, 1991; FREITAS et al., 1995; BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2001). Entretanto, a melhor época de aplicação do nitrogênio pode variar devido às condições ambientais e ao potencial produtivo da cultura.

Pöttker et al. (1984), trabalhando com doses de nitrogênio (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹) parceladas durante o crescimento do trigo, relatam que tais doses não influenciaram o rendimento de grãos de trigo, o peso de mil sementes e o peso hectolitro.

Na determinação da resposta do trigo à adubação nitrogenada verifica-se a importância em considerar o comportamento diferencial entre cultivares e linhagens em relação à eficiência de absorção e utilização do nitrogênio. Provavelmente, a falta de resposta do trigo a esse elemento, constatada em alguns trabalhos, tenha sido decorrente do uso de cultivares de baixo potencial produtivo (MIELNICZUK, 1982; FREITAS et al., 1995).

Em lavouras de grãos, a eficiência de uso do fertilizante nitrogenado é medida pela razão quilogramas de nitrogênio aplicado/tonelada de grão. Para produção de uma tonelada de grãos de trigo são necessários cerca de 30 kg de nitrogênio (SOUSA; LOBATO, 2002).

Halvorson et al. (2004), estudando o efeito de doses de nitrogênio (0, 28, 56, 84 e 112 kg ha⁻¹) na rotação trigo-milho e trigo-sorgo em solo de textura média, concluíram que a resposta da biomassa do trigo e do rendimento de grãos à fertilização nitrogenada variou de ano para ano, mas não com a rotação de culturas, obtendo o máximo rendimento de grãos com a dose de nitrogênio de 84 kg ha⁻¹.

A disponibilidade do nitrogênio no solo proveniente da adubação nitrogenada é influenciada, além da relação carbono/nitrogênio, por outros fatores, como o tipo de solo e a precipitação pluvial, que variam conforme o ano e o local (DA ROS et al., 2003).

Segundo Harper et al. (1987), a concentração de nitrogênio no trigo tem diminuído durante a estação de crescimento. Isso ocorre devido à lenta assimilação desse nutriente, quando comparado ao carbono. Portanto, o conhecimento do ciclo do nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera, suas interações com os demais nutrientes e sua influência nos compostos produtivos do trigo é necessária para maximizar a produtividade e a qualidade.

O nitrogênio tem acentuada influência na produtividade e na qualidade dos cultivos; porém, o uso indevido pode ocasionar prejuízos e problemas ambientais (CAMPBELL et al., 1995; CURTIN; WEN, 1999). Assim, aplicações equilibradas são necessárias e importantes para todo o sistema agrícola.

2.5 Potássio e a cultura do trigo

O Brasil consome atualmente cerca de 10 milhões de toneladas de trigo por ano (LANTMANN et al., 2005). Para suprir toda essa demanda são necessários investimentos e conjunto de tecnologias aliados ao bom manejo da adubação. Segundo Lantmann et al. (2005), um dos nutrientes importantes para a cultura do trigo é o potássio, cuja principal influência para este cereal tem sido atribuída à melhoria da estrutura do colmo, conferindo à planta maior resistência ao acamamento e às moléstias, além de favorecer a eficiência na utilização da água.

O potássio é responsável pelo transporte de aminoácidos na planta e pela abertura e fechamento de estômatos. Gross (1976) acrescenta que, em condições de alto suprimento de

nitrogênio, a adubação potássica poderá favorecer o equilíbrio nutricional das plantas, proporcionando maior firmeza dos colmos e melhorias no processo de enchimento de grãos.

A maior absorção de potássio em função da elevação do teor deste elemento no solo, resulta em aumento na translocação de fotossintatos para a espiga do milho e, conseqüentemente, para os grãos (ANDREOTTI et al., 2001).

Segundo Malavolta (1977), para que o trigo atinja produtividade de 2.000 kg ha⁻¹ são necessários 76 kg ha⁻¹ de K₂O, dos quais 10 kg ha⁻¹ são exportados pelos grãos e 42 kg ha⁻¹ são reciclados pela palha e raízes. Rosolem et al. (1993), estudando a dinâmica do potássio durante o desenvolvimento da cultura da soja, verificaram que o maior acúmulo do potássio foi nos grãos, mostrando a exportação do potássio acima dos níveis normais, a qual pode ocasionar o esgotamento mais rápido das reservas do solo ou do fertilizante aplicado.

Segundo Abrão e Korndorfer (1980), as respostas à aplicação de potássio em solos “nativos” ou recém-desbravados não têm sido satisfatórias, mostrando que as reservas de potássio no solo são suficientes para atender as necessidades das culturas. Entretanto, cultivos sucessivos sem a reposição do material vegetal e sem adubação potássica podem acarretar uma depauperação do solo.

Em estudos com a cultura do trigo, Fixen et al. (1986) avaliaram as respostas do cultivar de primavera à adubação potássica em solo com baixo teor desse nutriente (< 34 kg ha⁻¹ nos primeiros 60 cm do perfil). Verificaram que a fertilização potássica promoveu incremento de 70% na produtividade.

2.6 Relação nitrogênio : potássio

A interação entre nitrogênio e potássio tem sido estudada com relação à produção de massa seca, produção de grãos e qualidade do produto colhido, bem como a resistência à doença e ao acamamento da planta (USHERWOOD, 1982).

O nitrogênio e o potássio estão entre os mais extraídos por diversas culturas e têm merecido destaque em relação aos cereais. O nitrogênio é componente essencial de aminoácidos e proteínas, ácidos nucléicos, hormônios e clorofila, dentre os compostos orgânicos fundamentais à sobrevivência das plantas. O potássio está envolvido em diversas reações bioquímicas necessárias ao metabolismo vegetal.

A interação entre íons pode ocorrer em diferentes momentos e locais quando se considera o sistema solo-planta. Assim, poderá ocorrer no solo, considerando-se as diversas formas de equilíbrio e de transporte do íon, na rizosfera, nas membranas e dentro da planta (ROSOLEM, 2005). Dessa forma, toda a dinâmica do nutriente na planta e no solo deve ser conhecida, a fim de se entender melhor as interações e aperfeiçoar o uso dos fertilizantes nitrogenados e potássicos.

A interação entre nitrogênio e potássio obedece à Lei do Mínimo, pois quando o nitrogênio é aplicado em quantidade suficiente para haver elevação da produção, essa passa a ser limitada pelos baixos teores de potássio aplicados ao solo (BÜLL, 1993).

A resposta de uma cultura ao potássio depende, em grande parte, do nível em que se encontra a nutrição nitrogenada. Assim, quanto maior o suprimento de nitrogênio, maior o aumento de produtividade devido ao potássio, de modo que a possibilidade de interação desses dois nutrientes é reconhecida há muito tempo (HEATHCOTE, 1972; MURPHY, 1980; DIBB; THOMPSON JUNIOR, 1985).

Outro exemplo da interação de nitrogênio e potássio está ilustrado em um trabalho de Macleod (1969) o qual mostra que, na medida em que foi melhorada a nutrição potássica, os teores de nitrogênio na planta ficaram menores devido à diluição existente. Já com o teor baixo de potássio, mesmo altos teores de nitrogênio não resultaram em produtividade alta. Assim, quando não havia potássio suficiente, os teores deste nutriente na planta ficaram menores conforme a disponibilidade de nitrogênio era aumentada.

O metabolismo de nitrogênio nas plantas requer adequadas quantidades de potássio no citoplasma (XU et al., 2002). Trabalhos conduzidos por Ajay et al. (1970) e Dibb e Welch (1976), apontam conclusivamente para o fato de que a maior absorção de potássio permite rápida assimilação do NH_4^+ absorvido, mantendo seu teor baixo na planta e evitando a toxidez. Em plantas deficientes em potássio, há acúmulo de NH_4^+ , com aparecimento de lesões correspondentes à toxidez por este íon.

Segundo Dibb e Thompson (1985), o potássio melhora a utilização do NH_4^+ e reduz possíveis efeitos tóxicos e lesões em talos de tomate e nas folhas do milho, por exemplo. Embora, em Scherer et al. (1984) a presença de potássio na solução do solo reduziu a absorção de NH_4^+ . Alguns estudos revelam que não há competição na absorção entre NH_4^+ e K^+ (DALIPARTHY et al., 1994). Ajay et al. (1970) relataram que o potássio aumenta a assimilação do NH_4^+ em tomates e reforça que o K^+ não compete com NH_4^+ na absorção. Assim, essa inconstante conclusão da

interação de K^+ com NH_4^+ pode resultar na inibição da absorção de potássio e, em alguns casos, resultar em declínio de produtividade pela ausência de NH_4^+ na solução (XU et al., 2002).

Carvalho et al. (1991) estudaram o efeito da aplicação do nitrogênio e do potássio em um experimento com capim-Braquiária em Latossolo Vermelho-amarelo álico, observaram que houve efeito positivo da adubação nitrogenada na produção de massa seca dessa gramínea e que esse efeito dependeu da aplicação do potássio. Além disso, estes autores constataram que, com baixo nível de aplicação de potássio, a resposta ao nitrogênio foi limitada, mas com o aumento do nível de potássio, ocorreu acentuada resposta ao nitrogênio.

Martim et al. (1997) trabalharam com os capins bermuda Coastcross 1 e Tifton 85 num Latossolo Vermelho-amarelo, procurando avaliar alguns efeitos da interação entre o nitrogênio e o potássio. Estes autores constataram que a interação entre esses nutrientes foi significativa e bem evidente no terceiro crescimento das plantas, e que os maiores incrementos de produção ocorreram nas doses mais elevadas de potássio, enquanto as maiores concentrações de nitrogênio foram verificadas nas doses mais baixas de potássio. Este efeito foi decorrente do menor crescimento vegetativo, causando assim, acúmulo de nitrogênio em seus tecidos.

A adubação nitrogenada tem, por vezes, apresentado respostas de produtividade de forrageiras abaixo das esperadas em virtude de inadequados níveis de potássio, o que sugere haver relação entre absorção e aproveitamento destes dois macronutrientes (MONTEIRO et al., 1980).

Lavres Junior e Monteiro (2003), estudando o efeito de doses de nitrogênio e de potássio nas características produtivas do capim-Mombaça, verificaram que as doses desses nutrientes interagiram nos dois cortes do capim para a produção da área foliar total, comprimento e superfície radicular total e perfilhamento no segundo corte.

Farinelli et al. (2003), observaram que a cultura do arroz apresentava boa produção com a aplicação da dose de nitrogênio de 100 kg ha^{-1} sem a adubação potássica. Entretanto, quando o potássio foi fornecido em uma dose baixa de 25 kg ha^{-1} , a dose ótima de nitrogênio caiu para a metade, em clara demonstração da existência de interação.

A importância do potássio e do nitrogênio, tanto na produção de massa verde da parte aérea das plantas quanto na de grãos e biomassa radicular, é identificada em vários trabalhos; entretanto, alguns deles apresentam redução ou ausência de produtividade na presença desses

nutrientes, devendo-se esse fato a aspectos relacionados com fertilidade do solo, condições climáticas, potencial da cultura e desequilíbrio na aplicação desses nutrientes.

Cherney et al. (2004), em estudo sobre interação de nitrogênio e potássio durante cinco anos com o capim *Phalaris arundinaceae*, verificaram que a fertilização com esses nutrientes não causou grandes efeitos na distribuição dos nutrientes no perfil do solo, exceto o potássio, cuja disponibilidade foi acentuadamente reduzida após múltiplos anos de cultivo com apenas a presença do nitrogênio no programa de adubação. Esses autores relataram que o efeito da interação nitrogênio e potássio na produção de raízes não foi significativa, e a produção radicular com fertilização nitrogenada sem o complemento potássico foi 21% maior do que quando aplicou-se a combinação desses dois nutrientes.

O efeito negativo do potássio na produção radicular encontrado por Cherney et al. (2004) também havia sido observado por Katterer et al. (1998). Estes últimos autores verificaram que na ausência da adubação potássica a produção de biomassa radicular foi de 73% nos primeiros 15 cm do perfil do solo, mas quando o potássio foi adicionado, esse valor caiu para 53% na mesma profundidade.

Ferrari Neto et al. (1994) avaliaram as limitações nutricionais do capim-Colonião e do capim-Braquiária cultivados em Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. Observaram que na omissão no fornecimento de nitrogênio e potássio a produção de massa seca da parte aérea foi afetada significativamente pelo crescimento destas plantas, bem como a produção de massa seca de raízes. No capim-Colonião o efeito foi mais drástico por não haver rebrota. Para o crescimento das raízes o potássio mostrou-se o mais limitante, evidenciando que na condição de sua omissão as raízes tornaram-se muito finas e frágeis, rompendo-se facilmente.

Em trabalhos com a cultura do milho, Loué (1978) relata que o balanço de doses de nitrogênio e de potássio é importante desde os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura. Altos teores de nitrogênio com baixos teores de potássio, por exemplo, favorecem o acamamento. A interação desses nutrientes também influi nos aspectos qualitativos da cultura do milho, como conteúdo de proteína, qualidade da silagem e massa de grãos.

Keeney et al. (1967), avaliando o efeito da fertilidade do solo na qualidade e no crescimento do milho, verificaram que o potássio aumentou a produção, a eficiência do nitrogênio e a absorção total desse nutriente pela cultura, proporcionando melhoria na qualidade e aumento na concentração de proteína nos grãos devido ao maior fornecimento de nitrogênio.

O metabolismo do nitrogênio é importante para a produção de aminoácidos e produtividade das culturas e tem sido verificado que o potássio está envolvido na fase final do metabolismo do nitrogênio. Entretanto, alguns trabalhos relataram que o potássio está envolvido no início dos processos metabólicos do nitrogênio, como incorporação do nitrogênio mineral e especialmente na redutase do nitrato (RUAN et al., 1998; RUAN et al., 1999).

O conhecimento da interação entre nitrogênio e potássio é de suma importância para a produção de alimentos, pois além de altas produtividades, o equilíbrio no fornecimento desses nutrientes pode proporcionar máxima eficiência na utilização do nitrogênio pelas plantas.

2.7 Estimativa do teor de clorofila

A eficiência da fertilização nitrogenada é importante para alcançar metas de produtividade e qualidade na produção de cereais. Quantidades insuficientes de nitrogênio em trigo resultam em redução de produtividade (número reduzido de grãos), baixa qualidade de grãos (baixo conteúdo de proteína e semolina) e redução na lucratividade.

O medidor de clorofila SPAD-502 tem sido usado para estimar e monitorar a concentração de nitrogênio nas folhas pela medida da intensidade do verde (SCHEPERS et al., 1992). Além da concentração de nitrogênio nos tecidos das plantas, as leituras SPAD também têm sido empregadas para determinar a necessidade de fertilizantes nitrogenados (TURNER; JUND, 1991; PIEKIELEK, et al., 1992).

Segundo Malavolta (2006), os valores do clorofilômetro SPAD são calculados com base na quantidade de luz transmitida pela folha em duas regiões de comprimento de onda e tem sido usado para avaliar o estado nutricional com relação ao suprimento de nitrogênio, visto que o teor de clorofila – cor verde – se correlaciona com o teor desse nutriente. Para isso, entretanto, é necessário certificar-se de que a clorose seja devida à maior ou menor falta de nitrogênio.

O uso deste medidor oferece algumas vantagens. Por ser portátil e de fácil manuseio, possibilita economia de tempo e dinheiro, já que não há necessidade de se mandar as amostras ao laboratório; viabiliza o diagnóstico prévio de uma possível deficiência de nitrogênio, podendo prevenir um estado de carência severa, além de ser uma técnica não destrutiva e que permite a amostragem tantas vezes quantas necessárias, sem a destruição do limbo foliar (MINOLTA CAMERA CO., 1989).

O clorofilômetro SPAD é o método mais confiável para avaliação visual da intensidade do verde das folhas. As leituras do clorofilômetro em trigo correlacionam-se positivamente com a concentração de nitrogênio na folha, com o teor de NH_4^+ e NO_3^- no solo, com a produtividade de grãos e com o teor de proteína bruta (MATSUNAKA et al., 1997).

Parvizi et al. (2004) avaliaram a influência de doses de nitrogênio (0, 50, 100, 200 e 400 mg kg⁻¹), doses de manganês (0, 15 e 30 mg kg⁻¹) e a interação entre elas nas leituras do clorofilômetro; verificaram que as leituras SPAD aumentaram significativamente com a aplicação de nitrogênio de 100 mg kg⁻¹. Em experimentos com a cultura do milho, Schepers et al. (1992) relataram que o índice crítico do SPAD variou em função do híbrido, do estágio fenológico e das práticas culturais utilizadas.

As leituras SPAD em trigo podem variar entre variedades e cultivares. Follett et al. (1992) observaram que as leituras SPAD em trigo foram diretamente relacionadas com a clorofila e com a concentração de nitrogênio na folha para um único cultivar.

Conforme relatam Schepers et al. (1992), as diferentes relações entre concentração de nitrogênio nas folhas, leituras SPAD e produtividade em resposta à aplicação desse nutriente entre seis híbridos são atribuídas a fatores genéticos que controlam vários processos metabólicos.

Follett et al. (1992) estudaram as relações entre produtividade e concentração de nitrogênio nas folhas de trigo utilizando o clorofilômetro SPAD. Concluíram que é possível calibrar o clorofilômetro para avaliar ou prever a produção de grãos, concentração de nitrogênio na folha e disponibilidade de $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ no solo, embora, fatores como localização, práticas culturais, umidade disponível, nitrogênio no perfil do solo e diferentes cultivares possam afetar a eficiência na utilização do clorofilômetro.

Reis et al. (2006) verificaram que a leitura SPAD de clorofila correlacionou-se positivamente com a concentração de nitrogênio nas folhas e com a produtividade do cafeeiro. Tais autores relataram que a dose 350 kg ha⁻¹ de nitrogênio proporcionou maior teor foliar desse nutriente e maior leitura SPAD.

Manarin (2000) obteve efeito significativo do suprimento de nitrogênio nos valores SPAD medidos em lâminas de folhas recém-expandidas do capim-Mombaça, nos dois períodos de crescimento da forrageira. Verificou que o valor SPAD no primeiro crescimento variou entre 22,1 a 46,9, respectivamente quando se omitiu o nitrogênio na solução e quando se aplicou a dose do nutriente que proporcionou máximo valor SPAD.

O método de utilização do SPAD é considerado adequado para um diagnóstico e decisão rápida devido à sensibilidade nas leituras logo após a fertilização nitrogenada (FOLLET et al., 1992; DENUIT et al., 2002). Entretanto, sua precisão nas leituras pode ser afetada por fatores como: plantas estressadas pela deficiência de outros nutrientes; estresse hídrico; doenças; danos provocados por insetos e baixas temperaturas, que podem promover a redução dos níveis de clorofila nas folhas.

2.8 Redutase do nitrato

A assimilação de nitrogênio é um dos mais importantes processos metabólicos nas plantas. A redutase do nitrato é a enzima chave no processo completo da assimilação de nitrato pelas plantas (ALLEGRE et al., 2004). Os vegetais podem absorver nitrogênio na forma de nitrato (NO_3^-) ou amônio (NH_4^+), assimilando-o na forma de amônia (NH_3).

As plantas podem absorver e acumular grandes quantidades de nitrato nos seus tecidos sem assimilá-lo e, conseqüentemente, não sendo incorporado na forma de aminoácidos e proteínas. A concentração de nitrato no tecido vegetal pode atingir em torno de 10 g kg^{-1} da massa seca do vegetal, porém na média, varia de 0 a 2 g kg^{-1} da massa seca de tecido vegetal (FERNANDES; ROSSIELLO, 1995).

O nitrato absorvido pelas raízes é reduzido a nitrito pela redutase do nitrato no citoplasma, e o nitrito é reduzido a amônia pela redutase do nitrito nos cloroplastos. A amônia é incorporada rapidamente a compostos orgânicos via glutamina sintetase GS/GOGAT glutamato sintase e, ou, GDH glutamato desidrogenase (MARSCHNER, 1995).

As propriedades bioquímicas da GS, particularmente sua alta afinidade pelo amônio (em comparação com a GDH) e a localização de substancial proporção dessa enzima nos cloroplastos ou nos plastídeos das raízes, sugerem importante participação do GDH no processo assimilatório. Isto foi reforçado pela descoberta de Lea e Miflin (1974) de uma rota alternativa de produção de glutamato (GLU), através da detecção da atividade do GOGAT em plantas superiores. Posteriormente, ficou demonstrado que a rota GS/GOGAT era a principal via de assimilação do amônio (MIFLIN; LEA, 1976).

A assimilação redutiva do nitrogênio é um processo dispendioso energeticamente às plantas, razão porque ocorre predominantemente, nas folhas, centro da síntese de energia (ATP) e

agentes redutores (fornecedores de elétrons). O processo de incorporação do nitrogênio compete com a fotossíntese por carboidrato e energia, consumindo 12 ATPs para cada nitrogênio assimilado pela planta (BLOOM et al., 1992).

A redutase do nitrato foi o primeiro exemplo reconhecido de enzima em plantas que é induzida pelo substrato (BEEVERS et al., 1969). Esta indução é relativamente forte: na ausência de nitrato no substrato, a redutase do nitrato se apresenta em baixo nível. Plantas com deficiência de nitrato e expostas a concentrações externas de nitrato apresentam aumento na atividade da redutase do nitrato no intervalo de 2 a 6 horas de exposição a estes tratamentos (LI; OAKS, 1993). Além da indução por nitrato, a atividade da redutase do nitrato pode ser aumentada por outros fatores de crescimento das plantas, tais como: luz, açúcares ou CO₂ (KAISER; HUBER, 1994).

O equilíbrio da redutase do nitrato é determinado pela taxa de sua degradação, assim como, pela taxa da síntese da mesma. A meia vida da enzima redutase do nitrato, recém sintetizada, é de poucas horas na célula e quando a quantidade de nitrato no substrato diminui a atividade desta enzima é rapidamente reduzida (TAIZ; ZEIGER, 2002).

Estudos evidenciam que a atividade da enzima da redutase do nitrato é o principal processo limitador da assimilação do nitrogênio na maioria das plantas (SRIVASTAVA, 1990; LEA, 1997). A redutase do nitrato é algumas vezes utilizada como indicador da taxa de crescimento. No início de 1970, a atividade da redutase do nitrato era recomendada como um parâmetro bioquímico para calcular o índice de produtividade (VENKATESAN; GANAPATHY, 2004).

O nitrogênio e o potássio estão relacionados pela função do potássio na ativação da enzima redutase do nitrato. Correlação positiva entre a atividade da redutase do nitrato e a fertilização potássica foi encontrada em estudos conduzidos em campos de chá na China (RUAN et al., 1998). Em cultivos de chá na Região Sul da Índia a quantidade de fertilizante potássico é decidida com base na fonte de nitrogênio disponível (VENKATESAN; GANAPATHY, 2004).

Conforme observaram Venkatesan e Ganapathy (2004), incrementos nas doses de nitrogênio e de potássico resultaram em aumento da atividade da redutase do nitrato em plantas de chá. Estes autores verificaram que a redutase do nitrato foi máxima aos sete dias após a aplicação dos fertilizantes, sendo consideravelmente alta aos 28 dias e muito baixa aos 35 dias após a aplicação.

Segundo Lavres Junior (2001), a atividade enzimática da redutase do nitrato nas plantas torna-se uma importante ferramenta no auxílio da diagnose nutricional por ser indicadora da concentração de nitrogênio na planta, correlacionando-se com a produção de massa seca e com a concentração de nitrogênio no tecido foliar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e espécie vegetal utilizada

Em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP foi instalado um experimento no período de junho a agosto de 2006. Plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivar IAC 370 foram selecionadas para este estudo.

3.2 Caracterização do solo utilizado no experimento

Amostras de um Argissolo Vermelho Amarelo Abrúptico do município de Piracicaba - SP (22°42'30'' S, 47°38'00'' W, e aproximadamente 546 m de altitude) foram coletadas à profundidade de 0–0,2 m, passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, homogeneizadas e depositadas em vasos com capacidade para 3,0 kg de terra. A caracterização química das amostras de solo (Tabela 1) foi realizada utilizando-se os procedimentos analíticos descritos por Raij et al. (2001).

O pH foi determinado em solução de CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ na relação de 1:2,5. Fósforo, cálcio e magnésio foram extraídos com resina trocadora de íons e o potássio por Mehlich 1. A quantificação do fósforo e do potássio foi realizada por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente, enquanto a de cálcio e de magnésio foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

A análise granulométrica do solo foi efetuada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997). A classificação textural foi realizada de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, obtendo-se a classificação como arenoso.

Tabela 1 – Caracterização química e física do Argissolo Vermelho Amarelo utilizado no experimento

Parâmetro	Valor
pH CaCl ₂	4,0
P (mg dm ⁻³)	2,0
K (mmol _c dm ⁻³)	0,7
Ca (mmol _c dm ⁻³)	4,0
Mg (mmol _c dm ⁻³)	1,0
Al (mmol _c dm ⁻³)	5,0
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	20,0
S. B. (mmol _c dm ⁻³)	5,7
C.T.C (mmol _c dm ⁻³)	25,7
V (%)	22,0
M.O. (g dm ⁻³)	12,0
Cu (mg dm ⁻³)	0,3
Zn (mg dm ⁻³)	0,4
Mn (mg dm ⁻³)	13,1
Fe (mg dm ⁻³)	27
B (mg dm ⁻³)	0,19
S (mg dm ⁻³)	3,0
Areia (g kg ⁻¹)	860
Silte (g kg ⁻¹)	60
Argila (g kg ⁻¹)	80

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram constituídos por combinações de cinco doses de nitrogênio (0; 70; 140; 210 e 280 mg dm⁻³) com cinco doses de potássio (0; 50; 100; 150 e 200 mg dm⁻³). Empregou-se estudo de superfície de resposta baseado em desenho experimental composto central modificado de um fatorial 5² fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). Foram obtidas 13 combinações entre as doses dos nutrientes, em mg dm⁻³, assim definidas: 0-0; 0-100; 0-200; 70-50; 70-150; 140-0; 140-100; 140-200; 210-50; 210-150; 280-0; 280-100; 280-200. O delineamento foi de blocos aleatorizados com quatro repetições.

3.4 Instalação e desenvolvimento do experimento

Como o solo apresentou alta acidez e baixa saturação por bases, as amostras foram tratadas com 1125 mg de carbonato de cálcio P.A. e 375 mg de carbonato de magnésio P.A.,

cujas doses foram calculadas para uma relação 4:1 e elevação da saturação por bases a 60%. Após a incorporação dos carbonatos, as amostras foram incubadas por 20 dias com umidade referente a 60% da capacidade de retenção de água.

Após o período de incubação, as amostras foram submetidas à adubação mineral com fósforo e micronutrientes. O fósforo foi aplicado na dose de 300 mg dm^{-3} (superfosfato simples com 18% de P_2O_5). Os micronutrientes foram aplicados na forma de solução, sendo adicionados juntamente com a água de irrigação nas doses: $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de boro (H_3BO_3 com 17,7% de B); $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ com 25,6% de Cu) e $10,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ com 22,6% de Zn). Essas doses foram calculadas para elevar os teores ao nível médio-alto, indicados em Raij et al. (1997).

O nitrogênio e o potássio foram aplicados nas formas de uréia (44% de N) e cloreto de potássio (KCl P.A. com 60% de K_2O), preparando-se soluções contendo as combinações das doses desses nutrientes e aplicando-as com a água de irrigação.

Dez dias após a aplicação dos nutrientes e das combinações de nitrogênio e de potássio, foi realizada a semeadura utilizando-se quinze sementes por vaso e deixando-se seis plantas por vaso após o desbaste.

3.5 Valor SPAD

A leitura SPAD, que fornece a medida indireta do teor de clorofila na folha, foi realizada aos 30 dias após a semeadura, com o emprego do Chlorophyll Meter SPAD – 502 (MINOLTA CAMERA CO., 1989). Realizou-se a medida no terço-médio da lâmina foliar da primeira folha abaixo da folha bandeira (Figura 1), segundo as recomendações de Matsunaka et al. (1997). Santos (1997) verificou que os valores obtidos na parte mediana das folhas apresentavam melhor estabilidade do que os obtidos na porção basal, que eram subestimados. As leituras foram realizadas tomando-se o cuidado de evitar as nervuras das folhas. Foram realizadas doze leituras por unidade experimental, utilizando-se a média dessas leituras como valor SPAD para cada vaso.

Figura 1 – Leitura da unidade SPAD no terço-médio da lâmina foliar da primeira folha abaixo da folha bandeira

3.6 Atividade da redutase do nitrato

A atividade da redutase do nitrato foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Mulder et al. (1959). No dia anterior ao do corte das plantas foram coletadas amostras do terço médio da lâmina da primeira folha abaixo da folha bandeira de uma planta por vaso. Antes dessa coleta, as plantas foram colocadas em câmara-de-crescimento e expostas à luz artificial por duas horas, com temperatura constante em torno de 27°C, evitando assim interferências externas na atividade da enzima redutase e homogeneizando todas as parcelas experimentais.

Amostras de 200 mg de material verde foram incubadas por duas horas em meio de KNO_3 (4 ml) em tampão fosfato. Após a incubação, 1 ml do meio de incubação foi retirado e o NO_2^- presente foi determinado por adição de 1 ml de ácido sulfanílico e HCL a 20% para paralisar a reação, seguindo-se a adição de 1 ml de alfa-naftilamina para desenvolver a cor rósea ao reagir com o NO_2^- . A leitura foi realizada em colorímetro equipado com filtro de 560 nm. Utilizou-se a reta padrão de nitrito para cálculo da concentração de NO_2^- no meio.

3.7 Concentração de macronutrientes

Após o período de 80 dias de cultivo, a parte aérea das plantas foi colhida, separando-se as espigas; posteriormente as raízes também foram coletadas. Todo o material colhido foi secado em estufa a 65°C por 72 horas até peso constante, pesado e submetido à determinação da concentração de macro e micronutrientes segundo os procedimentos descritos em Malavolta (1997).

A digestão sulfúrica e o método analítico semi-micro Kjeldahl foram empregados para o nitrogênio. Para os demais macronutrientes, foi utilizada a digestão nítrico-perclórica. A quantificação foi feita utilizando-se o método colorimétrico para o fósforo, a espectrofotometria de absorção atômica para cálcio e magnésio, fotometria de chama para o potássio, e turbidimetria do cloreto de bário para o enxofre. Para o nitrogênio e o potássio foram calculadas as quantidades acumuladas na planta multiplicando-se a concentração do elemento em cada parte do vegetal pela quantidade de massa seca.

3.8 Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas utilizando-se o aplicativo “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 2000). Realizou-se inicialmente o teste F e, para casos de significância ($P < 0,05$) da interação de doses de nitrogênio e de potássio, efetuaram-se análises de regressão polinomial (superfície de resposta) pelo procedimento RSREG. Nos casos de interação não significativa ($P > 0,05$), utilizou-se o procedimento GLM para estudos de regressão, aplicando-o ao nutriente ou nutrientes para os quais o efeito foi significativo no teste F.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção de massa seca da parte aérea

A interação entre as doses de nitrogênio e de potássio foi significativa para a produção de massa seca da parte aérea das plantas de trigo, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial (Figura 2). De acordo com a equação, verificou-se que a dose 251 mg dm⁻³ de nitrogênio foi responsável pela máxima produção de massa seca da parte aérea; já a dose de potássio associada a essa dose de nitrogênio excedeu a mais alta dose empregada no estudo (200 mg dm⁻³).

Figura 2 – Produção de massa seca da parte aérea do trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

O fornecimento da combinação das doses mais baixas de nitrogênio e potássio comparadas com o emprego da dose 280 mg dm⁻³ de nitrogênio com 50 mg dm⁻³ de potássio, não apresentou efeito do suprimento de nitrogênio na produção da parte aérea. Deste modo, confirma-se a observação feita por Monteiro et al. (1980) de que na utilização do adubo nitrogenado se faz necessário o suprimento de potássio para que não haja limitações dos efeitos do nitrogênio.

A Figura 2 também mostra que em condições de baixas doses de nitrogênio, mesmo com o incremento das doses de potássio, a produção de massa seca da parte aérea foi baixa; no entanto, à medida que aumentaram as doses de nitrogênio associadas às maiores doses de potássio, a produção de massa seca da parte aérea foi incrementada.

Observou-se que a produção máxima de massa seca de parte aérea (17 g/vaso) foi encontrada quando se aplicou a combinação das maiores doses de nitrogênio (280 mg dm⁻³) com as maiores de potássio (200 mg dm⁻³).

No presente trabalho, aos 80 dias após a emergência, observou-se que, nas parcelas que não receberam o nitrogênio, ou aquelas que receberam a maior dose desse nutriente sem adição do potássio e ainda naquelas parcelas com doses mais baixas destes dois nutrientes, as folhas inferiores apresentavam-se secas, enquanto nas parcelas com combinação das mais elevadas doses de nitrogênio e de potássio as plantas estavam mais verdes, prolongando o período de retranslocação de açúcares e nitrogênio para as espigas.

Apesar de o potássio não participar de compostos estruturais nas plantas, esse nutriente desempenha importante papel em vários processos bioquímicos e fisiológicos dos vegetais. O potássio também pode influenciar a utilização de nitrogênio pelas culturas: segundo Xu et al. (1992), o crescimento de plântulas de milho tratadas com NH₄⁺ é mais vigoroso quando houver suplementação com potássio.

Em estudo realizado por Stromberger et al. (1994), incrementos na fertilização potássica promoveram maior concentração deste nutriente na massa seca de folhas, colmos e nas espigas do milho quando associados com nitrogênio na dose 168 kg ha⁻¹; porém, as respostas de produtividade devidas ao suprimento destes macronutrientes diferiram entre os quatro híbridos em estudo.

Lavres Junior e Monteiro (2003) observaram que no capim-Mombaça o perfilhamento máximo foi alcançado com a associação de nitrogênio e de potássio nas doses 342 e 396 mg L⁻¹, respectivamente. Para o capim-Braquiária submetido a combinações de doses de nitrogênio e de potássio, Ferragine (1998) observou que no primeiro corte do capim a dose 31 mmol L⁻¹ de nitrogênio combinada com a dose 6 mmol L⁻¹ de potássio resultou na maior produção de massa seca da parte aérea.

Cherney et al. (2004) verificaram que a produtividade de massa seca do capim canarygrass (*Phalaris arundinaceae* L.) foi aumentada com a fertilização nitrogenada, mas não

foi incrementada pelo suprimento de potássio, embora, sintomas de deficiências estivessem presentes após cinco anos de adubação exclusivamente com nitrogênio. O fornecimento de potássio pelo solo, cujo teor foi classificado como médio, foi limitado pela alta absorção pelas plantas supridas apenas com nitrogênio, exaurindo as reservas de potássio e conseqüentemente promovendo o aparecimento de deficiências nas plantas.

O solo utilizado nesse estudo revelou teor baixo de potássio ($0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e de argila (80 g kg^{-1}) (Tabela 1), representando um solo com baixas reservas e provavelmente com capacidade limitada de fornecimento deste nutriente, daí ter se mostrado altamente responsivo ao incremento da adubação potássica. Desse modo, por apresentar alta proporção de areia (860 g kg^{-1}) e por ser o potássio um nutriente altamente suscetível à lixiviação, deve-se programar a aplicação de fertilizantes nesse tipo de solo.

Andreotti et al. (2000) avaliaram a produção e absorção de nutrientes pela cultura do milho submetida à adubação potássica em três solos, verificaram que os teores de nitrogênio no colmo e nas folhas do milho foram afetados pelo tipo de solo e pelos seus valores de saturação por bases e teores de potássio.

Mondal (1982) relatou que nas culturas de arroz e trigo ocorre interação positiva entre nitrogênio e potássio e as respostas à aplicação de potássio nessas culturas foram incrementadas com aplicações de nitrogênio.

Panaullah et al. (2006), avaliando a absorção de potássio no cultivo de arroz e trigo em sucessão, verificaram que a adubação nitrogenada aumentou significativamente a absorção de potássio pela cultura do trigo. Segundo estes autores, o emprego correto da adubação nitrogenada incrementa a absorção de potássio em 57%.

Altas doses de potássio em plantas de cevada permitiram maior eficiência na utilização das doses de nitrogênio (MACLEOD, 1969). Altas doses de potássio em conjunto com altas doses de nitrogênio estimularam a produção de massa seca, aumentando a produtividade em campos de milho (EBELHAR et al., 1987; MACKENZI et al., 1988). Entretanto, Karlen et al. (1987) relataram que o acúmulo excessivo de potássio nas plantas resultou em diminuição da produtividade, interferindo também na absorção de nitrogênio.

Pesquisas revelaram que o suprimento de potássio associado à baixa quantidade de nitrogênio inibe a produção de massa seca, enquanto que altas doses de potássio combinadas com altas doses de nitrogênio interagem para aumentar a produção de grãos e massa seca em plantas

de milho (LUECKING et al., 1983; MACKENZIE et al., 1988). Desse modo, esses resultados revelam a importância do equilíbrio na fertilização nitrogenada e potássica para alcançar ótima produtividade.

4.2 Concentração de macronutrientes na parte aérea

4.2.1 Nitrogênio

O nitrogênio é considerado o elemento mineral mais abundante nas plantas, sendo componente essencial de biomoléculas e inúmeras enzimas. É o nutriente absorvido em maior quantidade pela cultura de trigo e também pode ser o mais limitante para as mesmas.

A interação entre as doses de nitrogênio e de potássio fornecidas para o trigo foi significativa para a concentração de nitrogênio na parte aérea, tendo os resultados se ajustado ao modelo polinomial (Figura 3). De acordo com esses resultados, as doses de nitrogênio e de potássio foram altamente determinantes na concentração de nitrogênio na parte aérea do trigo. Alterações na concentração de nitrogênio nos tecidos foliares em gramíneas em função da variação do suprimento desse nutriente têm sido amplamente documentadas (MONTEIRO, 2004).

Figura 3 – Concentração de nitrogênio na parte aérea do trigo em função das combinações das doses de nitrogênio e potássio

A concentração de nitrogênio variou de 5 a 22 g kg⁻¹ com as combinações das doses de nitrogênio e de potássio. Obteve-se a mínima concentração de nitrogênio na parte aérea com a combinação da dose 100 mg dm⁻³ de potássio sem o fornecimento do nitrogênio. A máxima concentração de nitrogênio foi obtida com a associação da maior dose desse nutriente (280 mg dm⁻³) sem o fornecimento do potássio. Esse fato pode ser explicado pelo efeito da concentração, resultante do menor crescimento das plantas provocado pela falta de potássio. Tal comportamento também foi encontrado por Lavres Junior (2001) em capim-Mombaça.

Os resultados de Karrou e Marunville (1994) revelaram que as concentrações de nitrogênio da parte aérea de três variedades de trigo aumentaram com o suprimento de nitrogênio. Resultados semelhantes foram encontrados por Parvizi et al. (2004) com aplicação de doses de nitrogênio e manganês em trigo; entretanto, a absorção de nitrogênio e a produção de massa seca decresceram com o emprego da mais alta dose de nitrogênio avaliada (350 mg kg⁻¹). Segundo o mesmo autor, a dose 200 mg kg⁻¹ de nitrogênio foi considerada a dose ideal, pois promoveu maior concentração do nutriente e produção de massa seca da parte aérea.

Durante o período vegetativo do trigo, a concentração de nitrogênio aumenta em todos os componentes da planta (HARPER et al., 1987). A alta absorção do nitrogênio no período vegetativo promove incrementos significativos na produção de massa seca, porém, na fase de alta demanda do nutriente para produção e enchimento de grãos, o restante do nitrogênio no solo pode limitar a produtividade e qualidade da produção.

A concentração de nitrogênio da parte aérea (Figura 3) apresentou valores muito abaixo daqueles encontrados em pesquisas anteriores com doses deste nutriente em trigo (COSSEY et al., 2002; YANO et al., 2005). Essa baixa concentração pode ser devida ao fato de o nitrogênio ter sido fornecido em uma única dose no início do cultivo das plantas. Diferenças no aproveitamento e na absorção do nitrogênio durante a senescência são possíveis devido a fatores externos como disponibilidade de água no solo e condições de temperatura (HARPER et al., 1987).

Da Ros et al. (2003) relataram que as culturas de trigo e milho mostraram-se responsivas à aplicação de nitrogênio. Esses autores observaram que a época de aplicação de nitrogênio não influenciou a produção de massa seca e o acúmulo de nitrogênio pelas culturas.

Na determinação da resposta do trigo à adubação nitrogenada, é importante considerar o comportamento diferencial entre cultivares e linhagens em relação à eficiência na absorção e utilização do nitrogênio (MIELNICZUK, 1982).

4.2.2 Potássio

Adubações com potássio resultam em qualidade superior de toda planta devido ao aumento da eficiência da fotossíntese, ao aumento da resistência a algumas doenças e à ótima eficiência no uso da água. O potássio proporciona também à cultura do trigo resistência ao acamamento, gerando colmos mais resistentes e auxiliando a produção de grãos mais pesados e de melhor qualidade.

As doses de nitrogênio e de potássio interagiram significativamente para a concentração de potássio na parte aérea do trigo, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial (Figura 4). A concentração de potássio na parte aérea variou de 5,0 a 33 g kg⁻¹, sendo a maior concentração verificada na combinação da dose mais alta de potássio com a dose mais baixa de nitrogênio. Tal

comportamento deve-se a baixa produção de massa seca, o que promoveu a concentração de potássio no tecido vegetal.

Figura 4 – Concentração de potássio na parte aérea do trigo em função das combinações das doses de nitrogênio e potássio

A concentração mais baixa de potássio nos tecidos foi verificada quando se combinou a dose mais baixa deste nutriente com as doses mais altas de nitrogênio empregadas neste estudo. O nitrogênio por ser um nutriente estimulador do crescimento e produção favoreceu aumento de massa seca dessas plantas; entretanto, o baixo suprimento de potássio limitou a produção e a concentração deste nutriente na parte aérea.

Efeitos das doses de nitrogênio resultando em decréscimo na concentração de potássio nas lâminas de folhas recém-expandidas foram obtidos por Batista (2002) no segundo corte do capim-Marandu: a dose 24,82 mmol L⁻¹ de nitrogênio na solução correspondeu à mínima concentração de potássio (9,2 g kg⁻¹).

Em solo com alto teor de potássio, Singh et al. (2002) avaliaram o balanço e a cinética de liberação deste nutriente sob cultivos sucessivos de arroz e trigo. Estes autores relataram que as aplicações de nitrogênio aumentaram a absorção de potássio pelas culturas, bem como a liberação do potássio retido nas partículas do solo, diminuindo o potássio não-trocável da superfície

externa dessas partículas. A incorporação de material orgânico juntamente com o fertilizante nitrogenado aumentou a liberação do potássio não-trocável e promoveu grandes quantidades de potássio na solução e nos sítios de troca.

Avaliando o efeito das aplicações de potássio na cultura do milho, Andreotti et al. (2001) observaram que o fornecimento de potássio resultou em colmos mais grossos e com maior concentração deste nutriente, sendo mais resistentes ao acamamento e ao quebramento.

4.2.3 Fósforo

Para a concentração de fósforo na parte aérea, houve significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, ajustando-se os resultados a equação ao modelo polinomial (Figura 5). A concentração de fósforo na parte aérea variou de 4 a 13 g kg⁻¹. A menor concentração desse nutriente foi verificada na combinação das doses 0 e 70 mg dm⁻³ de nitrogênio com as maiores doses de potássio. A maior concentração de fósforo na parte aérea foi observada com o fornecimento da mais elevada dose de nitrogênio (280 mg dm⁻³) combinada com a dose mais baixa de potássio. Tal associação também promoveu menor crescimento das plantas provocado pela ausência de potássio, que gerou acúmulo de fósforo neste tecido vegetal.

Figura 5 – Concentração de fósforo na parte aérea do trigo em função das combinações das doses de nitrogênio e potássio

Ao contrário, o fornecimento de elevadas doses de nitrogênio e de potássio (280 e 200 mg dm⁻³, respectivamente), ocasionaram as mais baixas concentrações de fósforo na parte aérea do trigo. Tal comportamento deve-se à diluição do nutriente no tecido vegetal, causada pela maior produção de massa seca de parte aérea.

Silveira (2005) observou decréscimo na concentração de fósforo em lâminas de folhas recém-expandidas do capim-Tanzânia devido ao efeito da diluição do nutriente na planta, promovido pelo aumento de produção de massa seca da parte aérea com o incremento nas doses de nitrogênio fornecidas em solução nutritiva.

A concentração adequada de fósforo nas folhas de trigo, segundo Marschner (1995), é de 3,0 a 5,0 g kg⁻¹ de massa seca. Assim, verifica-se que as concentrações encontradas nas folhas de trigo no presente estudo estão nessa faixa adequada ou acima dela.

A maior ou a menor eficiência no aproveitamento do fósforo presente no solo é provocada por diferenças na absorção, translocação e utilização desse nutriente pelas plantas, bem como pelas diferenças associadas às características morfológicas e fisiológicas das plantas (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998).

4.2.4 Cálcio

O cálcio é vital para várias funções na planta: auxilia na conversão do N-nitrato (N-NO_3) em formas necessárias para a formação de proteína, além de ativar um grande número de sistemas enzimáticos que regulam o crescimento da planta.

As doses de nitrogênio e de potássio interagiram significativamente na concentração de cálcio da parte aérea do trigo, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial (Figura 6). A concentração de cálcio na parte aérea variou de 4 a $14,0 \text{ g kg}^{-1}$. O aumento no fornecimento das doses de potássio influenciou negativamente a concentração de cálcio no tecido vegetal. Já o fornecimento de nitrogênio para as plantas promoveu incremento na concentração de cálcio na parte aérea das plantas.

Figura 6 – Concentração de cálcio na parte aérea do trigo em função das combinações das doses de nitrogênio e potássio

A menor concentração de cálcio na parte aérea (4 g kg^{-1}) foi encontrada na associação das doses 0 e 100 mg dm^{-3} de nitrogênio e potássio, respectivamente. A maior concentração de cálcio neste tecido vegetal (14 g kg^{-1}) foi encontrada na combinação da dose 280 mg dm^{-3} de nitrogênio com a menor dose de potássio. Além da alta concentração de cálcio, essa combinação também

promoveu baixa produção de massa seca de parte aérea promovendo, deste modo, acúmulo de cálcio nos tecidos das plantas de trigo.

Quando ocorreu a associação das maiores doses de nitrogênio e de potássio, a concentração de cálcio na parte aérea atingiu 7 g kg^{-1} , correspondendo à metade da maior concentração de cálcio encontrada neste estudo. Esse decréscimo acentuado da concentração de cálcio promovido pelo emprego de altas doses de potássio pode estar associado ao efeito antagônico existente entre esses nutrientes.

Em avaliações do capim-Mombaça sob doses de nitrogênio e de potássio, Lavres Junior (2001) observou que as concentrações de cálcio nas lâminas de folhas recém-expandidas diminuíram de forma linear com o suprimento de potássio na solução nutritiva, variando de 10,1 a $3,6 \text{ g kg}^{-1}$, quando as plantas receberam a dose 19,5 a 429 mg L^{-1} de potássio, respectivamente.

Andreotti et al. (2000) observaram que os solos com menor teor de argila e, conseqüentemente, menor CTC, quando supridos com fertilização potássica, apresentam elevação deste nutriente no solo e decréscimo da concentração de cálcio no colmo do milho.

4.2.5 Magnésio

A análise de variância da concentração de magnésio na parte aérea do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e de potássio. A concentração de magnésio na parte aérea foi influenciada significativamente pelas doses de nitrogênio (Figura 7) e de potássio (Figura 8) isoladamente.

A concentração de magnésio na parte aérea foi incrementada pelo suprimento das doses de nitrogênio, variando de 1,6 a $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ e ajustando-se à equação de primeiro grau (Figura 6). Segundo Marschner (1995), a concentração ideal de magnésio nas plantas de trigo é de 1,5 a $3,0 \text{ g kg}^{-1}$. Deste modo, a concentração deste nutriente na parte aérea do trigo obtida neste estudo correspondeu à faixa ideal.

Figura 7 – Concentração de magnésio na parte aérea do trigo em função das doses de nitrogênio

Verificou-se que o aumento da concentração de magnésio na parte aérea do trigo resultante das doses de nitrogênio ocorreu devido ao incremento na produção, absorção e, conseqüentemente, aumento na concentração deste nutriente no tecido vegetal.

Avaliando a produção de arroz sob doses de nitrogênio e magnésio, Choudhury e Khanif (2001) verificaram que o suprimento desses dois nutrientes promoveu aumento na absorção de magnésio pelas plantas; tal incremento foi atribuído à maior produção de palha e grãos decorrente do fornecimento do nitrogênio.

Trabalhando com a interação entre nitrogênio e cálcio em capim-Tanzânia, Silveira (2005) verificou que a concentração de magnésio nas folhas recém-expandidas decresceu de forma linear com o suprimento de nitrogênio na solução nutritiva.

As concentrações de magnésio na parte aérea do trigo variaram com as doses de potássio conforme modelo linear (Figura 8). A concentração de magnésio decresceu com o suprimento de potássio variando de 3,0 a 1,1 g kg⁻¹; essas concentrações também estão dentro da faixa de suficiência do nutriente em plantas de trigo (MARSCHNER, 1995), deste modo, não prejudicando a produtividade e o desenvolvimento da cultura.

Figura 8 – Concentração de magnésio na parte aérea do trigo em função das doses de potássio

O declínio na concentração do magnésio na parte aérea das plantas com o suprimento de potássio, também pode ser observado em Consolmagno Neto (2006) com capim-Tanzânia e Lavres Junior (2001) com capim-Mombaça.

O potássio é um forte competidor com outros cátions por causa da alta eficiência do sistema de absorção das plantas. Na ausência de K^+ na solução, a absorção de outros íons catiônicos é aumentada, uma vez que a competição é menos severa (ROSOLEM, 2005). Os efeitos internos entre potássio, cálcio e magnésio ocorrem na forma de inibição competitiva, normalmente no nível da membrana celular (EPSTEIN, 1975). Segundo Malavolta (1980), esse processo ocorre quando dois elementos se combinam com o mesmo sítio ativo do carreador. Um exemplo clássico é dado pelas altas doses de potássio no meio, as quais inibem a absorção de cálcio e magnésio e chegam muitas vezes a causar deficiência destes dois nutrientes, com queda na produção.

Marschner (1995) relata também que cátions como o potássio podem atravessar a membrana plasmática com maior velocidade, deprimindo a absorção de cátions mais lentos como o cálcio e o magnésio. Fonseca e Meurer (1997) concluíram que a competição entre potássio e magnésio ocorre em maior intensidade devido à similaridade de seus raios iônicos e ao potencial eletroquímico nos sítios de absorção, resultando menor ou maior acúmulo de um ou outro íon no solo.

Em estudo conduzido por Andreotti et al. (2000), o aumento das doses de potássio aplicado ao solo proporcionou decréscimo na concentração de magnésio no colmo do milho, resultando em correlação linear negativa. Estes autores também observaram que, à medida que se elevou o teor de potássio no solo, proporcionalmente houve diminuição na concentração de cálcio e magnésio nas folhas. Nesse mesmo estudo, a elevação da CTC do solo ocorreu com o aumento concomitante da concentração de magnésio no colmo. Entretanto, houve diminuição na concentração desse nutriente com o suprimento das doses de potássio.

Segundo Marschner (1995), o potássio e o cálcio competem efetivamente com o magnésio e diminuem a sua absorção à medida que se aumenta o fornecimento desses cátions para as plantas. Andrade et al. (2000) verificaram que a concentração de magnésio nas lâminas foliares do capim-Elefante decresceu de 1,9 para 1,0 g kg⁻¹ com a aplicação de potássio em doses entre 16 e 304 kg ha⁻¹.

4.2.6 Enxofre

De maneira geral, existem poucos estudos sobre o fornecimento de enxofre às plantas. O cultivo intensivo de solos com baixo teor de matéria orgânica e de argila, o uso de fertilizantes concentrados e a contínua exportação de enxofre sem reposição podem levar à diminuição da disponibilidade desse nutriente às plantas, possibilitando a deficiência deste nutriente e a diminuição do rendimento das culturas.

Para os valores da concentração de enxofre na parte aérea do trigo, ocorreu significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial (Figura 9). Nota-se que a concentração de enxofre na parte aérea variou de 1 a 7 g kg⁻¹. A menor concentração de enxofre foi verificada na interação das doses 0 e 100 mg dm⁻³ de nitrogênio e potássio, respectivamente; enquanto que a mais alta foi constatada na combinação da dose 280 mg dm⁻³ de nitrogênio com a menor dose de potássio. Desse modo, fica evidente o efeito positivo do nitrogênio na concentração de enxofre no tecido vegetal.

Figura 9 – Concentração de enxofre na parte aérea do trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

A planta absorve o enxofre principalmente na forma do íon sulfato (SO_4^{2-}) da solução do solo (MENGEL; KIRKBY, 2001). O enxofre na planta encontra-se na sua maior parte em aminoácidos e proteínas. As concentrações nas folhas variam pouco em plantas bem nutridas, estando, em geral, entre 1 e 4 g kg^{-1} (RAIJ, 1991).

Verificou-se que a variação na concentração de enxofre na parte aérea de trigo (1 a 7 g kg^{-1}) correspondeu à faixa ideal para o crescimento e desenvolvimento das plantas, conforme a concentração ótima do nutriente estabelecida por Raij (1991).

O enxofre é de extrema importância para o crescimento e produção de cereais. Segundo Mengel e Kirkby (2001), o enxofre é componente dos aminoácidos cisteína, metionina e cistina, os quais podem conter cerca de 90% do total de enxofre da planta. Além disso, faz parte da ferredoxina, molécula transferidora de elétrons envolvida na fotossíntese, na fixação de nitrogênio atmosférico e na redução de compostos oxidados, tal como o nitrato. Deste modo, esse nutriente promove também outras funções nas plantas, como aumento na produção de sementes, de massa seca da parte aérea e de raízes (SANTOS, 1997).

Avaliando as respostas de alguns cultivares de milho com aplicação de enxofre, Rheinheimer et al. (2005) observaram que o rendimento de grãos de milho aumentou com aplicações de sulfato, sendo os teores de enxofre nos grãos de 1,2 a 1,7 g kg⁻¹, e as quantidades deste nutriente exportada pelos grãos variaram de 11,5 a 17,5 kg ha⁻¹.

Jackson (2000) avaliou o efeito da absorção de nitrogênio e enxofre em canola (*Brassica napus* L.) e observou que a combinação da dose 200 kg ha⁻¹ de nitrogênio com 20 kg ha⁻¹ de enxofre promoveram máxima produtividade e teor máximo de óleo nas sementes.

Em experimentos de campo com nabo forrageiro e canola, Alvarez (2004) observou que o nabo forrageiro foi responsivo à fertilização com enxofre, chegando à máxima produção de massa seca com aplicação de 46,4 kg ha⁻¹ deste nutriente, mas não obteve respostas para as plantas de canola. Para Nascimento e Morelli (1980), a produção de massa seca de sorgo não apresentou aumento significativo com o fornecimento de enxofre.

Na cultura do trigo, o enxofre tem importante papel no processo de panificação, pois os radicais sulfridrilos (-SH) e dissulfeto (S-S) são indispensáveis para que a massa produzida pela farinha apresente adequada extensibilidade (WRIGLEY et al., 1984). Camargo et al. (1975), ao cultivarem trigo em solos ácidos e com baixo teor de matéria orgânica, encontraram incrementos na produtividade de massa seca quando as plantas foram supridas com enxofre.

Em trabalho realizado com várias culturas em rotação, Osório Filho (2006) relatou que a ausência de resposta ao enxofre nas culturas avaliadas pode estar relacionada à deposição de enxofre atmosférico no solo pela água da chuva, pois o cultivo de milho em casa-de-vegetação foi o único a apresentar incrementos em massa seca em função da adição de enxofre.

Avaliando a produção da cultura do trigo com aplicações de doses de enxofre utilizando o gesso como fonte deste nutriente, Caires et al. (2002) verificaram que a aplicação de gesso no solo incrementou a produção de massa seca da parte aérea e de grãos de trigo. Esse incremento correspondeu a 420 kg ha⁻¹ de massa seca da parte aérea com o suprimento de 8,2 Mg ha⁻¹ de gesso. Resultados similares de aplicações de gesso foram observados em Caires et al. (1999) na cultura do milho.

Caires et al. (2002) encontraram correlação positiva e significativa entre concentração de enxofre na folha e produtividade de grãos, indicando que respostas produtivas do trigo são incrementadas com o suprimento de S-SO₄²⁻ no solo.

A deficiência de enxofre interfere no aproveitamento de nitrogênio, restringindo o crescimento da planta, uma vez que uma das principais funções do enxofre está relacionada à conversão do nitrogênio não-protéico em protéico (MARSCHNER, 1995).

4.3 Produção de massa seca da espiga

Para a produção de massa seca de espiga do trigo houve significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, tendo os resultados se ajustado ao modelo polinomial (Figura 10). Conforme a equação apresentada, o valor máximo de produção de massa seca da espiga (25 g/vaso) ocorreu com a combinação da dose 271 mg dm⁻³ de nitrogênio com 195 mg dm⁻³ de potássio.

Figura 10 – Produção de massa seca das espigas do trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

Nota-se que na ausência no fornecimento de nitrogênio e de potássio e também na associação da maior dose de nitrogênio (280 mg dm⁻³) sem adição do potássio, a produção média de massa seca de espiga foi 7,5 g/planta para ambas as combinações.

Com o fornecimento da maior dose de nitrogênio (280 mg dm^{-3}), a produção de massa seca de espiga foi de 8 g/vaso; porém, quando o potássio foi associado à adubação nitrogenada, ambos nas doses mais elevadas, a produção de massa seca de espiga foi 25 g/planta. O nitrogênio e o potássio são absorvidos em grande quantidade pela cultura do trigo, incrementando a produção de espigas e promovendo melhor qualidade e peso de grãos.

Segundo Lee e Rudge (1986), a absorção do NO_3^- pelas plantas de cevada foi acelerada quando o fornecimento do nitrato foi associado ao de potássio. A resposta de uma cultura ao potássio depende, em grande parte, do nível em que se encontra a nutrição nitrogenada. Deste modo, quanto maior o suprimento de nitrogênio, maior será a produtividade devido ao potássio (ROSOLEM, 2005). Em condições de alto suprimento de nitrogênio, a adubação potássica poderá favorecer o processo de enchimento de grãos (GROSS, 1976).

Conforme observaram Andreotti et al. (2001), a adubação potássica no milho proporcionou incrementos na produção de grãos até a dose 60 mg kg^{-1} . Estes autores relataram ainda que a maior absorção de potássio em função da elevação do teor desse elemento no solo incrementou a translocação de fotossintatos para a espiga e, conseqüentemente, para os grãos.

Pöttker e Roman (1998) destacaram a importância de se estudar a produção de espigas, pois o rendimento de grãos de trigo é determinado por alguns componentes: números de grãos por espigas, número de espigas por unidade de área e disponibilidade de nitrogênio, entre outros fatores. Deste modo, o fornecimento do nitrogênio é de fundamental importância no período em que os componentes de produção estão sendo definidos (MARCHETTI et al., 2001).

O período crítico de suprimento de nitrogênio em trigo vai da emergência até a emissão da 7ª folha. Nos estádios iniciais deste período, o nitrogênio é necessário para potencializar o número máximo de espiguetas por espigas e, em conseqüência, o número de grãos por espigas. Nos estádios finais do período de crescimento, o nitrogênio é crítico para determinar o número de colmos por área (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2001). Nessa época o suprimento de nitrogênio também pode ser limitante para determinar o número de colmos que sobrevivem e produzem espigas (BRAZ et al., 2006).

4.4 Concentração de macronutrientes na espiga

Os dados da concentração de fósforo, cálcio, magnésio e enxofre não apresentaram significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio e nem para as doses desses nutrientes isoladas. Foram observados apenas resultados significativos da concentração de nitrogênio e potássio nesse órgão vegetal.

4.4.1 Nitrogênio

Para concentração de nitrogênio nas espigas do trigo, houve significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial (Figura 11). Verificou-se que a concentração de nitrogênio na espiga do trigo variou de 14 a 30 g kg⁻¹ sendo influenciado positivamente pelo fornecimento das doses de nitrogênio.

Figura 11 – Concentração de nitrogênio nas espigas do trigo em função das combinações das doses de nitrogênio e potássio

A concentração de nitrogênio na espiga aumentou com a dose desse nutriente aplicada, para quaisquer das doses de potássio. Contudo, as maiores concentrações foram sempre obtidas

nas doses mais baixas de potássio, pois a falta desse elemento, limitando o crescimento da espiga, pode ter contribuído para concentrar o nitrogênio nesse órgão.

As combinações do nitrogênio juntamente com o potássio promoveram maior crescimento e produção de espigas por planta, desse modo, redistribuindo todo o nitrogênio fornecido. Entretanto, quando foi fornecido apenas o nitrogênio para as plantas, as espigas apresentaram limitações no crescimento e no desenvolvimento das espiguetas; assim, esse desbalanço nutricional promoveu o acúmulo do nutriente nas espigas do trigo. O potássio interage na produção e principalmente na qualidade dos grãos de trigo. Segundo Andreotti et al. (2001), a absorção de potássio incrementa a translocação de fotossintatos para a espiga e, conseqüentemente, para os grãos.

No presente trabalho, as espigas não possuíram grãos totalmente formados, visto que o período experimental de apenas 80 dias não permitiu a maturação completa. Entretanto, pode-se verificar maiores concentrações de nitrogênio neste órgão do que na parte aérea.

O fornecimento de nitrogênio às plantas de trigo é de grande importância no período em que o potencial de rendimento está sendo estabelecido. Os componentes do rendimento, como o número de espigas por área e o número de espiguetas por espigas, sofrem forte influência do momento em que o nitrogênio é fornecido (BRAZ et al., 2006). No período compreendido entre a fase inicial até o início da diferenciação do primórdio floral, a falta de nitrogênio reduz a formação de espiguetas (FRANK; BAUER, 1996).

O nitrogênio é responsável por inúmeras funções na planta e, devido à condição de constituinte molecular, a aplicação do fertilizante nitrogenado afeta o crescimento da planta, produção, qualidade de grãos e sementes (DIDONET, 1994). Trabalhos realizados com trigo têm mostrado a existência de correlação positiva entre o teor de proteína e o vigor das sementes (CARVALHO; NAKAGAWA, 1988).

4.4.2 Potássio

Para a concentração de potássio nas espigas do trigo não se detectou significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio. Contudo, efeitos significativos para concentração de potássio nas espigas foram observados apenas para as doses de nitrogênio, com ajuste dos resultados ao modelo linear de regressão (Figura 12).

A concentração de potássio nas espigas teve pouca variação, sendo de 7,3 a 8,5 g kg⁻¹, respectivamente para as condições de baixo a alto suprimento de nitrogênio. As maiores doses de nitrogênio foram responsáveis pela maior concentração de potássio nas espigas provavelmente devido ao melhor balanço nutricional que ocorreu com suprimento de nitrogênio.

Figura 12 – Concentração de potássio nas espigas do trigo em função das doses de nitrogênio

4.5 Produção de massa seca de raiz

Apesar da importância que as raízes exercem na fixação e no suporte dos cereais, evitando o acamamento e aumentando a produção, as informações disponíveis na literatura a respeito da produção de biomassa e aspectos nutricionais do sistema radicular são escassas.

O estado nutricional das plantas tem influência nas propriedades de crescimento de suas raízes (ESHEL; WAISEL, 1996). Um sistema radicular bem desenvolvido é necessário para a nutrição e sustentação das plantas e, como consequência, para boa produtividade de grãos e forragem.

Para a produção de massa seca de raiz houve significância da interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, tendo os resultados se ajustado ao modelo polinomial (Figura 13). Segundo a equação obtida, a máxima produção de massa seca de raiz (cerca de 12 g/vaso)

ocorreu com a combinação da dose 90 mg dm⁻³ de nitrogênio com a dose 140 mg dm⁻³ de potássio.

Figura 13 – Produção de massa seca das raízes do trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

O estudo da superfície de resposta revela a importância do potássio no desenvolvimento radicular. Nota-se que nas doses mais baixas de potássio (0 e 50 mg dm⁻³) associadas com as doses mais altas de nitrogênio (210 e 280 mg dm⁻³) a produção média de massa seca radicular foi de apenas 6 g/vaso. Nas doses mais baixas de potássio, além da menor massa radicular, as raízes apresentaram-se mais frágeis, quebrando-se facilmente com as sucessivas lavagens.

Ferrari Neto (1991) em trabalho com gramíneas forrageiras verificou que a fragilidade das raízes ocorreu devido à absorção e translocação do potássio para a parte aérea em intenso crescimento, porém, em quantidades insuficientes para exercer a função de transportador de fotoassimilados até o sistema radicular. Conforme o mesmo autor, a omissão de potássio proporcionou redução significativa na produção de massa seca da parte aérea e, principalmente, na massa seca das raízes. Tal comportamento também pôde ser observado nesse trabalho (Figura 13), revelando o potássio como o nutriente potencializador da biomassa radicular.

O nitrogênio e o potássio são os íons de maior absorção na interface solo-raiz. A absorção desses íons depende da espécie da planta, das características químicas da solução do solo, da interface solo-raiz e do histórico nutricional da planta (SUBASINGHE, 2006). Estudos mostraram que a absorção de nitrato estimulou a absorção de K^+ em vários cultivos, sugerindo que o íon NO_3^- funciona como um ânion de mobilidade para absorção do K^+ e/ou seu transporte (ZSOLDOS et al., 1990; SUBASINGHE, 2006).

Subasinghe (2006) estudou o efeito do estresse nutricional na absorção de nitrogênio e potássio por dois cultivares de cana-de-açúcar, e observou que a produção de massa seca de raiz e de massa seca da parte aérea foram significativamente incrementadas pelo fornecimento das doses de nitrogênio e de potássio.

Avaliando o capim-Tanzânia com relação à interação entre doses de potássio e de magnésio, Consolmagno Neto (2006) verificou que a máxima produção de massa seca de raiz foi obtida com o fornecimento da dose $8,4 \text{ mmol L}^{-1}$ de potássio com a dose $1,9 \text{ mmol L}^{-1}$ de magnésio.

Marchetti et al. (2001) observaram que a combinação das doses $170,71 \text{ mg L}^{-1}$ de nitrogênio com $46,5 \text{ mg L}^{-1}$ de fósforo promoveu o máximo rendimento de massa seca radicular das plantas de trigo ($4,7 \text{ g/vaso}$).

4.6 Concentração de macronutrientes na massa seca de raiz

Os resultados da concentração de fósforo nas raízes não foram significativos para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio e nem para as doses desses nutrientes isoladas. Os resultados dos demais macronutrientes apresentaram significância para as doses isoladas de nitrogênio e de potássio.

4.6.1 Nitrogênio

O crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas sofrem grande influência das condições ambientais, porém, a disponibilidade de nutrientes exerce papel fundamental sobre ambos os parâmetros (LAVRES JUNIOR; MONTEIRO, 2003).

A análise de variância da concentração de nitrogênio na massa seca radicular do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e de potássio. Porém, foi constatado efeito significativo das doses de nitrogênio na concentração deste nutriente no sistema radicular das plantas (Figura 14). Nota-se que a concentração de nitrogênio na massa seca radicular aumentou linearmente com o suprimento de nitrogênio, variando de 6,4 a 12,3 g kg⁻¹.

Figura 14 – Concentração de nitrogênio nas raízes do trigo em função das doses de nitrogênio

Marschner (1995) relatou que o suprimento de nutrientes pode alterar fortemente o crescimento e a morfologia das raízes e o efeito é mais marcante para o fornecimento de nitrogênio, e também, que o seu efeito no aumento da área das raízes é freqüentemente mais acentuado com o suprimento de amônio do que de nitrato.

Respostas lineares na concentração de nitrogênio nas raízes foram obtidas por Manarin e Monteiro (2002). Esses autores verificaram que a concentração de nitrogênio nas raízes do capim-Mombaça variou de 8,2 a 18,6 g kg⁻¹ com o fornecimento deste nutriente na solução nutritiva.

Bonfim-da-Silva (2005), estudando doses de nitrogênio e de enxofre no capim-Braquiária, relatou que a concentração de nitrogênio nas raízes das plantas que receberam a maior dose de nitrogênio foi 1,44 vezes mais elevada do que a das plantas que não receberam o suprimento deste nutriente. No presente estudo, a concentração de nitrogênio nas raízes das plantas de trigo

que receberam a maior dose de nitrogênio foi 1,84 vezes mais elevada do que das plantas não adubadas com esse nutriente. Segundo Colozza (1998), em presença de maior quantidade de nitrogênio no solo, as raízes também passam a funcionar como órgão armazenador desse nutriente.

Maizlish et al. (1980) observaram o efeito do fornecimento de doses de nitrogênio (0; 21; 42; 105 e 210 mg L⁻¹) às plantas de milho cultivadas em solução nutritiva e concluíram que, após três dias da emergência, as diferenças no comprimento das raízes foram pequenas, porém significativas. Aos 10 dias após a emergência, o comprimento total das raízes na dose 21 e 210 mg L⁻¹ aumentou em 80% e 200%, respectivamente.

Lavres Junior (2001) constatou que a concentração de nitrogênio nas raízes do capim-Mombaça variou numa amplitude de 10,1 a 16,5 g kg⁻¹ com o aumento das doses de nitrogênio e potássio. No entanto, a concentração mais elevada de nitrogênio nas raízes foi de 24,5 g kg⁻¹ encontrada na combinação das doses 462 e 19,5 mg L⁻¹ de nitrogênio e potássio, respectivamente.

4.6.2 Potássio

A análise de variância da concentração de potássio na massa seca das raízes do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e potássio. A concentração de potássio nas raízes foi significativa para as doses de nitrogênio (Figura 15) e para as doses de potássio (Figura 16) isoladamente.

A variação da concentração de potássio na massa seca das raízes do trigo em função das doses de nitrogênio ajustou-se ao modelo quadrático de regressão (Figura 15). A concentração de potássio variou de 5,3 a 2,7 g kg⁻¹ com o aumento da dose de nitrogênio.

Através da equação de regressão, pode-se constatar que a concentração de potássio decresceu à medida que foi se elevando o fornecimento de nitrogênio. A máxima concentração de potássio na massa seca das raízes (5,33 g kg⁻¹) foi obtida quando não se aplicou nitrogênio, enquanto a mais baixa concentração (2,1 g kg⁻¹) foi obtida com a dose 200,57 mg dm⁻³ de nitrogênio.

Figura 15 – Concentração de potássio nas raízes do trigo em função das doses de nitrogênio

A concentração de potássio na massa seca das raízes do trigo aumentou em função das doses de potássio segundo modelo linear de regressão (Figura 16), variando de 1,6 a 4,9 g kg⁻¹. Pereira (2001) relatou que a concentração de potássio nas raízes do capim-Mombaça variou entre 1,8 a 13,0 g kg⁻¹ de massa seca quando as doses de potássio variaram de 9,75 a 468 mg L⁻¹, respectivamente.

Figura 16 – Concentração de potássio nas raízes do trigo em função das doses de potássio

4.6.3 Cálcio

No estudo do efeito das doses de nitrogênio e potássio na concentração de cálcio nas raízes do trigo não foi verificada significância para a interação entre esses nutrientes; no entanto, foi constatado efeito significativo para as doses de nitrogênio (Figura 17).

Os dados da concentração de cálcio na massa seca radicular ajustaram-se ao modelo quadrático de regressão em função das doses de nitrogênio. A concentração de cálcio variou de 3,8 a 5,3 g kg⁻¹ com o incremento das doses de nitrogênio, sendo a menor concentração de cálcio observada quando o nitrogênio não foi fornecido. Através da equação de regressão verificou-se que a dose 200 mg dm⁻³ de nitrogênio promoveu maior concentração de cálcio (5,8 g kg⁻¹) nas raízes do trigo.

Figura 17 – Concentração de cálcio nas raízes do trigo em função das doses de nitrogênio

Paciulli (1997), estudando a concentração de cálcio em três gramíneas tropicais, observou aumento na concentração de cálcio aos dois e seis meses após a primeira adubação nitrogenada para todas as doses de nitrogênio e gramíneas estudadas.

Em estudo da interação entre nitrogênio e enxofre, Batista (2002) observou que as mais elevadas concentrações de cálcio foram obtidas nas combinações da dose 462 mg L⁻¹ de nitrogênio associada às doses 41,6 a 60,8 mg L⁻¹ de enxofre, sendo as mais baixas concentrações

de cálcio encontradas com o fornecimento das doses 238 a 350 mg L⁻¹ de nitrogênio associadas à dose de 3,2 mg L⁻¹ de enxofre.

Informações sobre a concentração de nutrientes nas raízes do trigo relacionados ao cálcio são escassas. Respostas à calagem são mais frequentes, porém, o fornecimento de magnésio em sua formulação não permite a identificação do papel do cálcio no sistema radicular.

4.6.4 Magnésio

A análise de variância da concentração de magnésio nas raízes do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e de potássio. A concentração de magnésio nas raízes, contudo, foi influenciada significativamente pelas doses de nitrogênio (Figura 18) e pelas de potássio (Figura 19) isoladamente.

A concentração de magnésio nas raízes sofreu pouca variação com as doses de nitrogênio, aumentando linearmente de 0,2 a 0,32 g kg⁻¹ (Figura 18).

Figura 18 – Concentração de magnésio nas raízes do trigo em função das doses de nitrogênio

A concentração de magnésio decresceu de forma linear com o incremento das doses de potássio, variando de 0,33 a 0,2 g kg⁻¹ (Figura 19). Esse fato é atribuído ao efeito antagônico do potássio sobre o magnésio.

Figura 19 – Concentração de magnésio nas raízes do trigo em função das doses de potássio

A interação do potássio com o magnésio frequentemente pode ocorrer para plantas cultivadas em solos pobres em magnésio ou para culturas que requerem grandes quantidades de potássio para alta produção e boa qualidade (USHERWOOD, 1982; RAIJ, 1991).

Em estudo com capim-Mombaça, Pereira (2001) relatou que a concentração de magnésio nas raízes variou de 0,34 a 1,62 g kg⁻¹ com o suprimento de magnésio na solução nutritiva. Esse autor relata ainda que a concentração de magnésio nas raízes foi mais baixa que as encontradas nas demais partes da planta. Tal comportamento também foi observado neste estudo, onde a concentração de magnésio nas raízes em função das doses isoladas de nitrogênio e potássio foi mais baixa que a encontrada na parte aérea do trigo.

Fonseca e Meurer (1997) conduziram experimento com milho em solução nutritiva para verificar a relação antagônica entre o potássio e o magnésio, e observaram que o acúmulo de magnésio foi reduzido, tanto nas raízes como na parte aérea das plantas, com o aumento do potássio na solução. Tais autores sugeriram que este antagonismo esteja relacionado com o processo de absorção dos dois nutrientes pelas raízes das plantas.

Marschner (1995) relatou que a absorção de potássio em elevadas quantidades pode reduzir a absorção ou a disponibilidade fisiológica não somente do cálcio, mas também do magnésio às plantas. Esse fato confirma-se no presente trabalho, pois com a elevação das doses

de potássio ocorreu redução na concentração de cálcio e magnésio na parte aérea e nas raízes do trigo.

4.6.5 Enxofre

A interação entre as doses de nitrogênio e potássio não foi significativa para a concentração de enxofre nas raízes do trigo. Apenas as doses de nitrogênio tiveram efeito positivo e significativo, com ajustes dos resultados ao modelo de regressão de primeiro grau (Figura 20). A concentração de enxofre na massa seca radicular aumentou linearmente de 3,6 a 4,9 g kg⁻¹ com o aumento do fornecimento da dose de nitrogênio.

Figura 20 – Concentração de enxofre nas raízes do trigo em função das doses de nitrogênio

Segundo Rheinheimer et al. (2005), as plantas apresentam diferentes habilidades em absorver, translocar e utilizar o enxofre e, por isso, exigem diferentes teores de SO₄²⁻ disponível no solo.

Batista e Monteiro (2006) observaram que o incremento na dose de nitrogênio na solução nutritiva resultou em redução da concentração de enxofre nas raízes do capim-Marandu, variando de 2,6 a 0,4 g kg⁻¹ com o fornecimento das doses 14 e 462 mg L⁻¹ de nitrogênio, respectivamente. Esses autores relatam ainda que tal comportamento ocorreu devido ao efeito de diluição, uma vez

que, à medida que se aumentou a dose de nitrogênio, observou-se incremento da massa seca de raízes.

4.7 Acúmulo de nitrogênio e potássio nos componentes da planta

4.7.1 Acúmulo de nitrogênio nas folhas

A análise de variância do acúmulo de nitrogênio nas folhas do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e potássio. O acúmulo de nitrogênio nas folhas das plantas foi significativo para as doses de nitrogênio segundo modelo linear de regressão (Figura 21), não tendo havido efeito do potássio. O acúmulo de nitrogênio nas folhas do trigo aumentou com o fornecimento das doses de nitrogênio variando de 69,8 a 210,1 g/seis plantas.

Figura 21 – Quantidade de nitrogênio acumulado nas folhas do trigo em função das doses de nitrogênio

Da Ros et al. (2003), avaliando a produção de massa seca e o acúmulo de nitrogênio pelas culturas de milho e trigo, observaram que a produção de massa seca e o acúmulo de nitrogênio na

parte aérea das plantas foram incrementados pelo fornecimento de doses de nitrogênio em cobertura.

4.7.2 Acúmulo de potássio nas folhas

Para o acúmulo de potássio nas folhas do trigo não se detectou significância para a interação entre as doses de nitrogênio e potássio. Mas efeitos significativos das doses de potássio foram verificados para o acúmulo deste nutriente nas folhas, com ajustes dos resultados ao modelo linear de regressão (Figura 22). De acordo com esse modelo, o acúmulo de potássio aumentou de 50,6 para 365 g/seis plantas com a aplicação desse nutriente.

Figura 22 - Quantidade de potássio acumulado nas folhas do trigo em função das doses de potássio

Segundo Büll (1993), as quantidades extraídas dos nutrientes variam em função da produção obtida, que depende de fatores como variedade, nível e disponibilidade de nutrientes, manejo da cultura e condições climáticas, entre outros.

O potássio é geralmente o segundo nutriente acumulado em maior quantidade pelas culturas (TAIZ; ZEIGER, 2002). O potássio encontra-se predominantemente na forma iônica K^+ , uma vez que o nutriente não participa de componentes funcionais e estruturais da planta; assim, a

decomposição dos restos vegetais libera-o na sua totalidade (BRAZ et al., 2004). Desse modo, pode-se considerar que o índice de aproveitamento do potássio proveniente dos restos culturais seja elevado.

4.7.3 Acúmulo de nitrogênio nas espigas

As doses de nitrogênio e de potássio interagiram significativamente para o acúmulo de nitrogênio nas espigas do trigo, tendo os resultados se ajustado ao modelo polinomial (Figura 23). O acúmulo de nitrogênio nas espigas variou de 111 a 572 g/seis plantas. O menor acúmulo foi encontrado na combinação da menor dose de nitrogênio com a menor de potássio, e o maior acúmulo na combinação da maior dose de nitrogênio com a maior de potássio.

Em avaliações da produção de grãos, massa seca e acúmulo de nutrientes pelo milho, Fernandes et al. (1999) observaram que mais de 50% da quantidade total de nitrogênio, fósforo, magnésio, enxofre e zinco, acumulados na massa seca da parte aérea das plantas de milho encontrava-se nos grãos.

Neste estudo, observou-se que o acúmulo de nitrogênio nas espigas das plantas de trigo foi maior que o verificado nas folhas. Avaliando a absorção e a translocação de macronutrientes por três cultivares de arroz, Reis et al. (2005) observaram que cerca de 60% do nitrogênio total da parte aérea foi exportado para os grãos, o que reflete a translocação da maior parte do nitrogênio para esse órgão vegetal.

Figura 23 - Quantidade de nitrogênio acumulado nas espigas das plantas de trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

4.7.4 Acúmulo de potássio nas espigas

As doses de nitrogênio e de potássio interagiram significativamente para o acúmulo de potássio nas espigas do trigo, com ajustes dos resultados ao modelo polinomial de regressão (Figura 24). O acúmulo de potássio nas espigas variou de 55 a 214 g/seis plantas. O menor acúmulo de potássio foi encontrado na combinação das menores doses de nitrogênio e de potássio, e o maior, na combinação das maiores doses.

De modo geral, as quantidades de nitrogênio acumuladas nas espigas do trigo (111 a 572 g/seis plantas) foram superiores às de potássio. Tal comportamento deve-se a alta redistribuição do nitrogênio para os órgãos reprodutivos por ocasião da maturação da planta.

Figura 24 - Quantidade de potássio acumulado nas espigas das plantas de trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

4.7.5 Acúmulo de nitrogênio nas raízes

Os resultados do acúmulo de nitrogênio nas raízes não foram significativos para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio e nem para as doses desses nutrientes isoladas. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de o nitrogênio não acumular nas raízes por se tratar de um nutriente com elevada redistribuição para os tecidos mais novos e órgãos de reprodução, como por exemplo, para as espigas (Figura 23).

4.7.6 Acúmulo de potássio nas raízes

A análise de variância do acúmulo de potássio nas raízes do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e potássio; no entanto, foi constatado efeito significativo para as doses de potássio (Figura 25).

Nota-se que as doses de potássio influenciaram acentuadamente no acúmulo deste nutriente nas raízes, tendo os resultados se ajustado ao modelo linear de regressão. O acúmulo de

potássio nas raízes variou de 11,8 a 54 g/seis plantas com o fornecimento das doses 0 e 200 mg dm⁻³ de potássio, respectivamente.

Figura 25 – Quantidade de potássio acumulado nas raízes das plantas de trigo em função das doses de potássio

Segundo Camacho et al. (1995), o potássio na maioria das culturas é um elemento tipicamente vegetativo, isto é, acumula-se nas raízes, caules e folhas, aparecendo em teores relativamente baixos nos órgãos reprodutivos. Tal observação confirma-se neste estudo com plantas de trigo.

4.8 Estimativa do teor de clorofila através do valor SPAD

Além de presente em biomoléculas fundamentais como proteínas e aminoácidos, o nitrogênio é constituinte das clorofilas (MENGEL; KIRBY, 2001). A clorofila tem como precursor inicial o glutamato; assim, a disponibilidade de nitrogênio pode influenciar decisivamente a capacidade fotossintética das plantas. O conteúdo de clorofila das folhas representa um parâmetro apropriado na avaliação da aquisição de nitrogênio pelas plantas, sob diferentes condições ambientais.

Para os resultados das leituras do teor de clorofila nas folhas do trigo obtidos por meio do Chlorophyll Meter SPAD-502 ocorreu significância para a interação entre as doses de nitrogênio e de potássio, com ajustes com resultados ao modelo de regressão polinomial (Figura 26).

Figura 26 – Teor de clorofila mensurado em valor SPAD das folhas localizadas no terço-médio das plantas de trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

Por meio da equação verificou-ser que as concentrações de nitrogênio e de potássio necessárias para a obtenção do valor máximo em unidades SPAD (57 unidades SPAD) seriam de 240 e 174 mg dm⁻³, respectivamente. A dose 200 mg dm⁻³ de potássio, associada às doses 70 a 280 mg dm⁻³ de nitrogênio, correspondeu a área dos maiores valores SPAD.

Nota-se que o menor valor em unidades SPAD (22 unidades SPAD) ocorreu na combinação da maior dose de nitrogênio com a menor dose de potássio. Nessa mesma combinação as plantas apresentaram maior concentração de nitrogênio na parte aérea (Figura 3), pois este nutriente foi acumulado no tecido vegetal devido ao crescimento limitado das plantas. Entretanto, os teores de clorofila mostraram-se como um bom parâmetro para prever a produção e o acúmulo de nutrientes, se correlacionando com a produção de massa seca da parte aérea (Figura 2), de espigas (Figura 10) e com o acúmulo de nitrogênio nas folhas do trigo (Figura 21).

Segundo Stancheva e Dinev (1995), o conteúdo máximo de pigmentos fotossintéticos em folhas de milho e trigo foi observado nas plantas que apresentaram maior crescimento vegetativo. Donato et al. (2004), avaliando o teor de clorofila em variedades de cana-de-açúcar submetidas a doses de nitrogênio, observaram que a variedade com maior acúmulo de biomassa também mostrou o maior conteúdo de clorofilas *a* e *b*. Tal observação também pode ser aplicada no presente estudo, onde a combinação das maiores doses de nitrogênio e de potássio promoveu maior produção de massa seca de parte aérea, espigas, raízes e maior teor de clorofila das folhas medido pelo índice SPAD.

Segundo Shadchina e Dmitrieva (1995), a determinação do conteúdo de clorofila em folhas de trigo representou um parâmetro apropriado para a avaliação da aquisição de nitrogênio pelas plantas e, além disso, pôde fornecer um diagnóstico confiável a respeito das condições nutricionais das plantas.

Em geral, a concentração de nitrogênio nas folhas e as leituras do clorofilômetro mostraram tendências similares devido ao papel do nitrogênio na síntese da clorofila. Indicadores do status do nitrogênio nas culturas ajudam eficientemente na fertilização do trigo durante toda sua estação de crescimento (DEBAEKE et al., 2006).

Giunta et al. (2002) verificaram que as leituras SPAD foram positivamente correlacionadas com a concentração de nitrogênio na folha em uma população de 17 cultivares de trigo durum. Debaeke et al. (2006) também relataram que as leituras SPAD foram bem sucedidas, independentemente do cultivar de trigo.

Bonfim-da-Silva (2005), em estudo com capim-Braquiária submetido à combinação de doses de nitrogênio e de enxofre, obteve no segundo e terceiro crescimento do capim, e com a maior dose de nitrogênio empregada no experimento (400 mg dm^{-3}) os valores SPAD de 47 e 42, respectivamente.

Batista e Monteiro (2007), em estudo com capim-Marandu submetido à combinação de doses de nitrogênio e de enxofre, observou que para o primeiro crescimento do capim os valores SPAD foram afetados principalmente pelas doses de nitrogênio quando combinadas com altas doses de enxofre.

Argenta et al. (2001), comparando a relação entre a leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível nas folhas de milho, verificaram que as leituras realizadas com clorofilômetro estimavam adequadamente o grau de esverdeamento do estágio do híbrido

avaliado no estudo. Esses autores relatam ainda que a leitura realizada pelo clorofilômetro estimou com precisão o teor de clorofila na folha de milho, além de apresentar vantagens de maior rapidez, menor custo e de não implicar em destruição das folhas.

Segundo Piekielek e Fox (1992), os índices SPAD podem ser utilizados como ferramenta no manejo do nitrogênio em plantas de milho. Schepers et al. (1992) relataram que as diferentes relações entre concentração de nitrogênio nas folhas, leitura do clorofilômetro e resposta à produtividade entre seis híbridos de milho submetidos à aplicação de nitrogênio, são atribuídas a fatores genéticos que controlam vários processos metabólicos.

Estudando o manejo do nitrogênio na cultura do trigo por meio de medidas realizadas pelo clorofilômetro, Reeves et al. (1993) concluíram que o clorofilômetro SPAD mostrou-se útil para determinar a exigência de nitrogênio para o trigo. Tal observação também pode ser aplicada neste estudo, onde as leituras SPAD estimaram adequadamente o acúmulo de nitrogênio nas folhas do trigo, além de se correlacionar com a produção de massa seca de parte aérea e espigas. Dessa forma, o clorofilômetro SPAD pode ser utilizado com segurança no acompanhamento da utilização do nitrogênio pelas plantas de trigo.

4.9 Atividade da enzima redutase do nitrato

O metabolismo do nitrogênio é muito importante para formação de aminoácidos e proteínas, proporcionando maior produtividade às culturas. Pesquisas sobre absorção de nitrato surgem da necessidade de entender o processo de aproveitamento e assimilação do nitrogênio, promovendo maior eficiência no uso desse nutriente no sistema solo-planta.

A análise de variância da atividade da enzima redutase do nitrato (RNO_3^-) das folhas do trigo revelou interação não significativa entre as doses de nitrogênio e de potássio. A atividade desta enzima nas folhas do trigo sofreu influência significativa somente das doses de nitrogênio, ajustando-se ao modelo quadrático de regressão (Figura 27).

Figura 27 – Atividade da enzima redutase do nitrato na folhas do trigo em função das combinações de doses de nitrogênio e de potássio

A atividade da enzima redutase do nitrato demonstrou pequena variação, alterando de 0,21 a 0,27 $\mu\text{mol de NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ com aumento da dose 0 para 280 mg dm^{-3} de nitrogênio. Verificou-se através da equação de regressão que a máxima atividade da enzima redutase do nitrato foi de 0,36 $\mu\text{mol de NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ com o fornecimento da dose 158 mg dm^{-3} de nitrogênio. A partir dessa dose, o aumento no fornecimento de nitrogênio promoveu decréscimo da atividade da enzima. Tal comportamento pode ser devido ao fato de que a atividade da enzima tenha sido limitada pela ausência de outros nutrientes, como o molibdênio.

O maior fornecimento do nitrogênio (280 mg dm^{-3}) utilizando como fonte a uréia pode ter promovido maior excreção de íons H^+ pelas raízes das plantas e, conseqüentemente, ocasionado diminuição do pH e da disponibilidade de molibdênio nessas condições. O pH da rizosfera diminui com a absorção de NH_4^+ , causando exsudação de H^+ pelas raízes para manter a eletroneutralidade ou o balanço de cargas dentro da planta (HAVLIN et al., 2005). Tal comportamento também foi observado por Primavesi et al. (2005) com o capim-Coastcross.

Segundo Havlin et al. (2005) diferenças em duas unidades de pH têm sido observadas na absorção de NH_4^+ versus NO_3^- . Essa acidificação observada para a absorção de NH_4^+ pode afetar a disponibilidade e a atividade biológica de ambos nutrientes na zona radicular.

Avaliando a absorção de cátions e ânions pelo capim-Coastcross, Primavesi et al. (2005) observaram que o pH da camada 0-10 cm do solo, sofreu redução no tratamento que recebeu 200 kg ha⁻¹ de nitrogênio por corte, para as plantas que receberam tanto uréia quanto nitrato de amônio como fonte desse nutriente.

Apesar da pequena quantidade absorvida pela planta, o molibdênio é considerado essencial por fazer parte de duas enzimas: a redutase do nitrato e a nitrogenase (DECHEN et al., 1991). Com a diminuição do pH o molibdênio torna-se indisponível para a planta, e em casos de deficiência desse nutriente a atividade da enzima redutase do nitrato em plantas não leguminosas é reduzida em cerca de 26% e o conteúdo de óxido nítrico cai cerca de 44% (XU; ZHAO, 2003).

Cazzeta e Villela (2004) observaram que a aplicação de 20 kg ha⁻¹ de molibdênio como H₂MoO₄ incrementou o desenvolvimento do capim-Tanner grass (*Brachiaria radicans* Napper) e a atividade da enzima redutase do nitrato.

O pico da atividade da enzima redutase do nitrato foi observada na dose 158 mg dm⁻³ de nitrogênio e possivelmente nessa dose o nitrogênio estava na forma de NO₃⁻, possibilitando elevada atividade da enzima. Porém, nas doses mais elevadas de nitrogênio, possivelmente esse nutriente estava disponível na forma de NH₄⁺ para as plantas. A atividade da enzima redutase do nitrato é influenciada, além da luminosidade e da temperatura, pela concentração de NO₃⁻ no substrato (MENGEL; KIRKBY, 2001).

Avaliando a atividade da enzima redutase do nitrato nas folhas do capim tanner grass, Cazzeta e Villela (2004) observaram que o nitrogênio fornecido na forma de NH₄⁺ pela uréia promoveu pequeno crescimento das plantas e baixa atividade da enzima redutase do nitrato, quando comparado ao fornecimento de nitrogênio por outras fontes (NaNO₃ e , NH₄Cl). Esses autores observaram que a taxa de hidrólise em solos contendo baixos níveis de matéria orgânica tende a ser baixo, e nas condições de umidade e oxidação sobre as quais o solo foi mantido nesse estudo o NH₄⁺ foi lentamente oxidado a NO₃⁻.

A diminuição da atividade da enzima também pode ser explicada pelo maior suprimento de nitrogênio ter promovido elevada produção de fitomassa e, conseqüentemente, aumento na absorção de nitrogênio do substrato. Lavres Junior e Monteiro (2006) verificaram que a atividade da redutase do nitrato foi incrementada com o suprimento de nitrogênio na solução para os dois cortes do capim-Aruana. Esses autores observaram que a atividade da enzima redutase do nitrato variou de 0,07 a 0,13 μmol de NO₂⁻ g⁻¹ h⁻¹ e de 0,04 a 0,09 μmol de NO₂⁻ g⁻¹ h⁻¹ no primeiro e no

segundo cortes, respectivamente. Embora a atividade da enzima tenha sido determinada com o mesmo intervalo de tempo de crescimento das plantas (23 e 24 dias, respectivamente, no primeiro e segundo corte) o fato de as plantas já estarem estabelecidas proporcionou maior consumo de NO_3^- antes da avaliação da RNO_3^- no segundo crescimento, visto que a primeira avaliação foi efetuada no dia seguinte à troca de solução nutritiva, enquanto a segunda determinação da atividade enzimática foi realizada quatro dias após a renovação das soluções nutritivas.

Avaliando a atividade da enzima redutase do nitrato em plantas de chá, Venkatesan e Ganapathy (2004) observaram que a atividade da enzima foi incrementada devido ao suprimento das doses de nitrogênio e de potássio. Esses autores relataram ainda que a máxima atividade ($0,5 \mu\text{mol de NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) mostrou-se aos 7 dias após a fertilização, caindo posteriormente para um valor mínimo ($0,22 \mu\text{mol de NO}_2^- \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) aos 35 dias após a aplicação dos fertilizantes.

Lea (1997) relatou que a atividade da redutase do nitrato é o principal passo na assimilação de nitrogênio na maioria das plantas. Em avaliações da atividade da enzima redutase do nitrato em cana-de-açúcar, Donato et al. (2004) observaram que todas as variedades em estudo apresentaram baixos valores de atividade em meios de cultura com baixa concentração ou desprovidos de nitrogênio.

5 CONCLUSÕES

Nos limites das doses de nitrogênio e de potássio estudadas para o trigo, pode-se concluir que:

- Houve interação positiva entre nitrogênio e potássio, resultando em aumento na produção de massa seca da parte aérea, espigas e raízes das plantas de trigo.
- O potássio associado ao nitrogênio promoveu maior absorção e, conseqüentemente, maior aproveitamento do nitrogênio.
- A concentração de nutrientes na massa seca da parte aérea e das espigas aumentou com o fornecimento do nitrogênio associado ao potássio; porém, o suprimento de potássio promoveu diminuição na concentração de magnésio na massa seca da parte aérea das plantas.
- A concentração de nitrogênio, cálcio, magnésio e enxofre nas raízes não foi influenciada pela interação nitrogênio versus potássio, mas aumentou com o fornecimento de nitrogênio. O emprego das doses de potássio aumentou a concentração desse nutriente, porém, promoveu decréscimo na concentração de magnésio neste tecido vegetal.
- O acúmulo de nitrogênio e potássio nas folhas, espigas e raízes foi diretamente relacionado com a produção de massa seca desses componentes.
- Os maiores acúmulos de nutrientes pelo trigo foram o de nitrogênio nas espigas, seguindo do potássio nas folhas e nas raízes das plantas.
- A associação do nitrogênio com o potássio aumentou o teor de clorofila das folhas. Esse teor correlacionou-se diretamente com a produção de massa seca da parte aérea e das espigas, e também com o acúmulo de nitrogênio nas folhas.
- A atividade da enzima redutase do nitrato foi influenciada apenas pelo fornecimento do nitrogênio.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 21-26, 1998.

ABRÃO, J.R.; KORNDORFER, G.H. Efeito residual e acumulativo da adubação potássica na sucessão trigo-soja, em Oxissolo do Planalto Riograndense. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO, 11., 1980, Porto Alegre. Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1980. p. 158-173.

AJAY, O.; MAYNARD, D.N.; BARKER, A.V. The effects of potassium on ammonium nutrition of tomato. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 818-821, 1970.

ALLEGRE, A.; SILVESTRE, J.; MORARD, P.; KALLERHOFF, J.; PINELLI, E. Nitrate reductase regulation in tomato roots by exogenous nitrate: a possible role in tolerance to long-term root anoxia. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, p. 2625-2634, 2004.

ALVAREZ, J.W.R. **Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul**. 2004. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

ANDRADE, A.C.; FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A. Produtividade e valor nutritivo do capim-Elefante cv. Napier sob doses crescentes de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 29, p. 1589-1595, 2000.

ANDREOTTI, M.; RODRIGUES, J.D.; CRUSCIOL, C.A. C.; SOUZA, E.C.A.; BULL, L.T. Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 145-150, 2001.

ANDREOTTI, M.; SOUZA, E.C.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; RODRIGUES, J.D.; BULL, L.T. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2437-2446, 2000.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 715-722, 1999.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, n. 2, p. 158-167, 2001.

BARBER, S.A. Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake. In: MEINSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 309-324.

BATISTA, K. **Respostas do capim-Marandu a combinações de doses de nitrogênio e enxofre**. 2002. 91 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. sistema radicular do capim-marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 821-828, 2006.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Nitrogen and sulphur in marandu grass: relationship between supply and concentration in leaf tissues. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 44-51, 2007.

BEEVERS, L.; SHRADER, L.E.; FLISCHER, D.; HAGEMAN, R.H. The role of light and nitrate in the induction of nitrate reductase in radish cotyledons and maize seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 40, p. 691-698, 1969.

BLAKE, L.; MERCIK, S.; KOERSCHENS, M.; GOULDING, K.W.T.; STEMPEN, S.; WEIGEL, A.; POULTON, P.R.; POWLSON, D.S. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 216, p. 1-14, 1999.

BLOOM, A.J.; SUKRAPANNA, S.S.; WARNER, R.L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. **Plant Physiology**, Rockville, v. 99, p. 1294-1301, 1992.

BONFIM-DA-SILVA, E.M. **Nitrogênio e enxofre na recuperação de pastagem de capim-Braquiária em degradação em Neossolo Quartzarênico com expressiva matéria orgânica**. 2005. 123 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BRAZ, A. J. B. P.; SILVEIRA, P. M.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, F. J. P. Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 2, p. 83-87, 2004.

BRAZ, A.J.B.P.; SILVEIRA, P.M.; KLIEMANN, H.J.; ZIMMERMANN, F.J.P. Adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo em sistema de plantio direto após diferentes culturas. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 193-198, 2006.

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

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 317-323, 2001.

BULL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFÓS, 1993. p. 63-145.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 357-364, 2002.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 315-327, 1999.

CAMACHO, R.; CALVACHE, A.M.; FALCÃO, N.; FERNANDEZ, F.; DEMATTÊ, J.A.M.; MALAVOLTA, E. Avaliação do estado nutricional do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em solução nutritiva, com variação no fornecimento de N, P e K. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 422-425, 1995.

CAMARGO, C.E.; VEIGA, A.A.; PESSINI, A.L.; MONTEIRO, D.A. Adubação do trigo. VII – Experiências com N, P, K e S em diferentes tipos de solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 34, n. 18, p. 273-286, 1975.

CAMPBELL, C. A.; MYERS, R.J.K.; CURTIN, D. Managing nitrogen for sustainable crop production. **Fertilizer Research**, Hague, v. 42, p. 277-296, 1995.

CANTARELLA, H.; ABREU, C.A.; BERTON, R.S. Fornecimento de nutrientes pela matéria orgânica do solo. In: ENCONTRO SOBRE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO: PROBLEMAS E SOLUÇÕES, 1992, Botucatu. **Anais ...** Botucatu: FCA, 1992. p. 63-122.

CARVALHO, M.M.; MARTINS, C.E.; VERNEQUE, R.S. Respostas de uma espécie de brachiaria à fertilização com nitrogênio e potássio em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 195-200, 1991.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes**: ciência, tecnologia e produção. 3. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 424 p.

CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J.; KAMPF, N.; PINTO, L.F.S. Mineralogia e fontes de potássio em solos do Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 579-587, 2002.

CAZZETA, J. O.; VILLELA, L. C. V. Nitrate reductase activity in leaves and stems of tanner grass (*Brachiaria radicans* Napper). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 640-648, 2004.

CHERNEY, J.H.; KETTERINGS, Q.M.; ORLOSKI, J.L. Plant and soil elemental status as influenced by multi-year nitrogen and potassium fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, n. 6, p. 991-1014, 2004.

CHOUDHURY, T.M.A.; KHANIF, Y.M. Evaluation of effects of nitrogen and magnesium fertilization on rice yield and fertilizer nitrogen efficiency using ¹⁵N tracer technique. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 855-871, 2001.

COELHO, M.A.O.; SOUZA, M.A.; SEDIYAMA, T.; RIBEIRO, A.C.; SEDIYAMA, T.; RIBEIRO, A.C.; SEDIYAMA, C.S. Respostas da produtividade de grãos e outras características agrônômicas do trigo EMBRAPA-22 irrigado, ao nitrogênio em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 555-561, 1998.

COLOZZA, M.T. **Rendimento e diagnose foliar dos capins Aruana e Mombaça cultivados em Latossolo Vermelho – Amarelo adubado com doses de nitrogênio**. 1998. 127 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

CONSOLMAGNO NETO, D. **Combinação de doses de potássio e magnésio na produção e nutrição mineral do capim-Tanzânia**. 2006. 83 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

COSSEY, D.A.; THOMASON, W.E.; MULLEN, R.W.; WYNN, K.J.; WOOLFOLK, C.W.; JOHNSON, G.V.; RAUN, W.R. Relationship between ammonium and nitrate in wheat plant tissue and estimated nitrogen loss. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, p. 1429-1442, 2002.

CUNIBERTI, M.B. **Fertilizacion nitrogenada, proteínas y calidad del trigo**. Córdoba: Estacion Experimental Agropecuária Marcos Juarez, 1996. p. 70-74. (Informacion para Extension, 33).

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 2005. p. 71-86.

CURTIN, D.; WEN, G. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 410-415, 1999.

DA ROS, C.O.; SALET, R.L.; PORN, R.L.; MACHADO, J.N.C. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes métodos de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 5, p. 799-804, 2003.

DALIPARTHY, J.; BARKER, A.V.; MONDAL, S.S. Potassium fractions with other nutrients in crops: A review focusing on the Tropics. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 1859-1886, 1994.

DEBAEKE, P.; AUSSÉNAC, T.; FABRE, J.L.; HILAIRE, A.; PUJOL, B.; THURIES, L. Grain nitrogen content of winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) as related to crop management and to the previous crop. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 5, p. 273-286, 1996.

DEBAEKE, P.; ROUET, P.; JUSTES, E. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: application to Durum Wheat. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 75-92, 2006.

DECHEN, A. R.; HAAG, H.P.; CARMELLO, Q.A.C. Mecanismos de absorção e de translocação de micronutrientes. In: FERREIRA, M. E. **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. p.79-111.

DENUIT, J.P.M.; OLIVIER, M.J.; GOFFAUX, J.L., HERMAN, J.P.; GOFFART, J.P.; DESTAIN, J.P.; FRANKINET, M. Management of nitrogen fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop nitrogen assessment. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 847-853, 2002.

DIBB, D.W.; THOMPSON JUNIOR, W.R. Interaction of potassium with other nutrients. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 515-533.

DIBB, D.W.; WELCH, L.F. Corn growth as affected by ammonium vs. nitrate absorbed from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 89-94, 1976.

DIDONET, A.D. Revisão sobre aspectos fisiológicos envolvendo qualidade e teor protéico do grão de trigo. In: SÁ, M.E.; BUZZETTI, S. **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. cap.15, p. 249-255.

DONATO, V.M.T.S.; ANDRADE, A.G.; SOUZA, E.S.; FRANÇA, J.G.E.; MACIEL, G.A. Atividade enzimática em variedades de cana-de-açúcar cultivadas in vitro sob diferentes níveis de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1087-1093, 2004.

EBELHAR, S.A.; KAMPRATH, E.J.; MOLL, R.H. Effects of nitrogen and potassium on growth and cation composition of corn genotypes differing in average ear number. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 875-881, 1987.

EMBRAPA. **Manual de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA TRIGO. **O trigo no Brasil**. Disponível em: <
http://www.cnpt.embrapa.br/aunidade/trigo_brasil.htm >. Acesso em: 06 fev. 2007.

EMBRAPA TRIGO. **Trigo**. Disponível em: <
<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/index.htm> >. Acesso em: 06 fev. 2007.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas**: princípios e perspectivas. Tradução de E. Malavolta. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 341 p.

ESHEL, A.; WAISEL, Y. Multiform and multifunction of various constituents of one root system. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots**: the hidden half. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 175-192.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Cultura do milho**: aspectos fisiológicos e manejo da água. Piracicaba: (Informações Agrônômicas, 73). Instituto da Potassa e do Fosfato, 1996. 4 p.

FARINELLI, R.; FORNASIERI FILHO, D.; PENARIOL, F.G.; BORDIN, L.; LEMOS, L.B. Influência da adubação nitrogenada e potássica nos componentes de produção de arroz de terras altas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD – ROM.

FERNANDES, F.C.S. **Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.), em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto**. 2006. 198 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FERNANDES, L.A.; VASCONCELLOS, C.A.; FURTINI NETO, A.E.; ROSCOE, R.; GUEDES, G.A.A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produção de grãos e matéria seca e acúmulo de nutrientes pelo milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1691-1698, 1999.

FERNANDES, M.S.; ROSSIELLO, O.P. Mineral nitrogen in plant physiology and plant nutrition. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 14, p. 111-148, 1995.

FERRAGINE, M.D.C. **Combinações de doses de nitrogênio e potássio na nutrição mineral de capim-Braquiária**. 1998. 84 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FERRARI NETO, J. **Limitações nutricionais para o colônião (*Panicum maximum* Jacq.) e braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.) em Latossolo da Região Noroeste do Estado do Paraná.** 1991. 126 p. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1991.

FERRARI NETO, J.; FAQUIN, V.; VALE, F.R. Limitações nutricionais do colônião (*Panicum maximum*, Jacq.) e da braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.), em amostras de um latossolo do noroeste do Paraná: I. produção de matéria seca e perfilhamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 538-551, 1994.

FIXEN, P.E.; BUCHENAU, G.W.; GELDERMAN, R.H.; SCHUMACHER, T.E.; GERWING, J.R.; CHOLICK, F.A. Influence of soil and applied chloride on several wheat parameters. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 736-740, 1986.

FOLLET, R.H.; FOLLET, R.F.; HALVARSON, A.D. Use a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 23, p. 517-697, 1992.

FONSECA, J.A.; MEURER, E.J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 47-50, 1997.

FRANK, A.B.; BAUER, A. Temperature, nitrogen and carbon dioxide effects on spring wheat development and spikelet numbers. **Crop Science**, Madison, v. 36, n. 3, p. 659-665, 1996.

FREITAS, J.G.; CAMARGO, C.E.O.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; CASTRO, J.L. Eficiência e resposta de genótipos de trigo ao nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 229-234, 1995.

GIUNTA, F.; MOTZO, R.; DEIDDA, M. SPAD readings and associated leaf traits in durum wheat, barley and triticale cultivars. **Euphytica**, Wageningen, v. 125, p. 197-205, 2002.

GROSS, A. **Abonos: guía práctico de la fertilización**. 4.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1976. 447 p.

HALVORSON, A.D.; NIELSEN, D.C.; REULE, C.A. Nitrogen fertilization and rotation effects on no-till dryland wheat production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, 2004.

HARPER, L.A.; SHARPE, R.R.; LANGDALE, G.W.; GIDDENS, J.E. Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant and aerial nitrogen transport. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 965-973, 1987.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management**. 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HEATHCOTE, R.C. **Fertilization with potassium in the Savanna zone of Nigeria**. Bern: Potash and Phosphate Institute, 1972. p. 71-77. (Potash Review, Subject 16, 57th suite).

HENSINGER, P. How do plants acquire mineral nutrients? – Chemical processes involved in the rhizosphere. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 64, p. 225-265, 1998.

HERRMANN, A.; TAUBE, F. Nitrogen concentration at maturity – an indicator of nitrogen status in forage maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 201-210, 2005.

JACKSON, G.D. Effects of nitrogen and sulfur on Canola yield and nutrient uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 644-649, 2000.

KAISER, W. M.; HUBER, S. C. Post-translational regulation of nitrate reductase in higher plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 106, p. 817–827, 1994.

KARLEN, D.E.; SADLER, E.J.; CAMP, C.R. Dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation rates by corn on Norfolk loamy sandy. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 649-656, 1987.

KARROU, M.; MARUNVILLE, J.W. Response of wheat cultivars to different soil nitrogen and moisture regimes 2. Nitrogen uptake, partitioning and influx. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 745-761, 1994.

KATTERER, T.; ANDREN, O.; PETTERSSON, R. Growth and nitrogen dynamics of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 153-164, 1998.

KEENEY, D.R.; BAUMGARDT, B.R.; STANGEL, P.J.; LIEBHARDT, W.C.; BEESTMAN, G.B.; PETERSON, A.R. Effects of soil fertility on the quality of crops grown for silage. **Research Report**, Madison, v. 29, p. 1-11, 1967.

LANTMANN, A.F.; CASTRO, C.; WIETHOLTER, S. O potássio na cultura do trigo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 2005. p. 723-742.

LAVRES JUNIOR, J. **Combinações de doses de nitrogênio e potássio para o capim–Mombaça**. 2001. 103 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F.A. Perfilamento, área foliar e sistema radicular do capim-Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1068-1075, 2003.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F. A. Diagnose nutricional de nitrogênio no capim-Aruana em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 829-837, 2006.

LAVRES JUNIOR, J.; FERRAGINE, M.D.C.; GERDES, L.; RAPOSO, R.W.C.; COSTA, M.N.X.; MONTEIRO, F.A. Yield components and morphogenesis of Aruana grass in response to nitrogen supply. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 632-639, 2004.

LEA, P.J. Primary nitrogen metabolism. In: DAY, P.M.; HARBORN, J.B. (Ed.). **Plant biochemistry**. New York: Academic Press, chap. 7, p. 273-313. 1997.

LEA, P.J.; MIFLIN, B.J. An alternative route for nitrogen assimilation in higher plants. **Nature**, London, v. 251, p. 614-616, 1974.

LEE, R.B.; RUDGE, R.A. Effects of nitrogen deficiency on the absorption of nitrate and ammonium by barley plants. **Annals of Botany**, London, v. 57, p. 471-486, 1986.

LI, X. Z.; OAKS, A. Induction and turnover of nitrate reductase in *Zea mays*. Influence of NO_3^- . **Plant Physiology**, Rockville, v. 102, p. 1251-1257, 1993.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

LONGNECKER, N.; KIRBY, E.J.M.; ROBSON, A. Leaf emergence, tiller growth, and apical development of nitrogen-deficient spring wheat. **Crop Science**, Madison, v. 33, p. 154-160, 1993.

LOUÉ, A. The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients. In: CONGRESS INTERNATIONAL OF THE POTASH INSTITUTE, 11. p. 407-433. 1978, Bern. **Proceedings...** Bern: International Potash Institute, 1978.

LUECKING, M.A.; JOHNSON, J.W.; HIMES, F.E. Effects of increasing the rates of potassium and nitrapyrin on nutrient uptake by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 247-249, 1983.

MACKENZIE, A.F.; PHILLIP, E.E.; KIRBY, P.C. Effects of added urea and potassium chloride on yields of corn over four years and on soil potassium. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 773-777, 1988.

MACLEOD, L.B. Effects of N, P and K and their interactions on the yield and kernel weight of barley in hydroponic culture. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, p. 26-29. 1969.

MAGALHÃES, J.C.A.J. Calagem e adubação para trigo na região do cerrado. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, n. 50, p. 23-28, 1979.

MAIZLISH, N.A.; FRITTON, D.D.; KENDALL, W.A. Root morphology and early development of maize at varying levels of nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 25-31, 1980.

MALAVOLTA, E. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**, São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. **O potássio e a planta**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1977. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 2005. p. 179-230.

MANARIN, C.A. **Respostas fisiológicas, bioquímicas e produtivas do capim- Mombaça a doses de nitrogênio**. Piracicaba, 2000. 58 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MANARIN, C.A.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio na produção e diagnose foliar do capim-Mombaça. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 59, p. 115-123, 2002.

MARCHETTI, M.E.; CARAMORI, T.B.A.; CAMPOS, A.M.B. Resposta de duas espécies de trigo ao nitrogênio e ao fósforo em solução nutritiva. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 25, n. 4, p. 925-933, 2001.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTIM, A.R.; MONTEIRO, F.A.; CARMELLO, Q.A.C. Interação entre nitrogênio e potássio nos capins Coastcross 1 e Tifton 85 cultivados num oxissolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26. 1997, Rio de Janeiro. 1 CD-ROM. **Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

MATSUNAKA, T.; WATANABE, Y.; MIYAWAKIA, T.; ICHIKAWA, N. Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 43, n. 1, p. 127-134, 1997.

MATTOS, W.T. **Diagnose nutricional de potássio em duas espécies de braquiária**. 1997. 74 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

MELLO, F.A.F.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; ARZOLLA, S. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1989. 400 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. London: Kluwer Academic, 2001. 849 p.

MIELNICZUK, J. Adubação nitrogenada. In: FUNDAÇÃO CARGILL. **Trigo no Brasil**. Campinas, v. 2, cap. 7, p. 294-301. 1982.

MIFLIN, B.J., LEA, P.J. The pathway of nitrogen assimilation in plants. **Phytochemistry**, New York, v. 15, p. 873-885, 1976.

MINOLTA CAMERA. **Manual for chlorophyll meter SPAD-502**. Osak, 1989. 22 p.

MONDAL, S.S. Potassium nutrition at high levels of N fertilization on rice. **Potash Review**, Bern, v. 3, p. 1-4, 1982.

MONTEIRO, F.A. Concentração e distribuição de nutrientes em gramíneas e leguminosas forrageiras. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 2., 2004, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, DZO, 2004. p. 71-107.

MONTEIRO, F.A.; LIMA, S.A.A.; WERNER, J.C. Adubação potássica em leguminosas e em capim-colônio (*Panicum maximum* Jacq.) adubado com níveis de nitrogênio ou consorciado com leguminosas. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 37, n. 1, p. 127-147, 1980.

MONTEIRO, H.C.F. **Dinâmica de decomposição e mineralização de nitrogênio, em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras**. 2000. 41 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

MULDER, E.G.; BOXMA, R.; VAN VENN, W.L. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissue. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 10, p. 335-355, 1959.

MURPHY, L.S. Potassium interactions with other elements. In: POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE. **Potassium for agriculture: a situation analysis**. Atlanta, 1980. p. 183-209.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Dinâmica de liberação de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 43-47, 1991b.

NASCIMENTO, J.A.L.; MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. I. Formas no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p. 131-135, 1980.

NUTTALL, W.F.; MALHI, S.S. The effect of time and rate of N application on the yield and N uptake of wheat, barley, flax and four cultivars of rapeseed. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 71, p. 227-238, 1991.

OLIVEIRA, E.F.; FRANCO, F.A.; BEGO, A. Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio para duas cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) IAC 5 e Nambu. In: ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS DO ESTADO DO PARANÁ. **Resultados de pesquisa com trigo e triticale nos anos de 1979 e 1980**. Cascavel, 1981. p. 180-186.

OSORIO FILHO, B.D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada**. 2006. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PACIULLI, A.S. **Efeito de diferentes épocas de corte e doses de nitrogênio sobre a produção, composição química e digestibilidade “in vitro” de três gramíneas tropicais do gênero *Cynodon***. 1997. 92 p. Dissertação (Mestrado em Forragicultura e Pastagens) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

PANAULLAH, G.M.; TIMSINA, J.; SALEQUE, M.A.; ISHAQUE, M.; PATHAN, A.B.M. B.U.; CONNOR, D.J.; SAHA, P.K.; QUAYYUM, M.A.; HUMPHREYS, E.; MEISNER, C.A. Nutrient uptake and apparent balances for rice-wheat sequences. III. Potassium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 173-187, 2006.

PARVIZI, Y.; RONAGHI, A.; MAFTOUN, M.; KARIMIAN, N.A. Growth, nutrient status and chlorophyll meter readings in wheat as affected by nitrogen and manganese. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 1387-1399, 2004.

PEREIRA, W.L.M. **Doses de potássio e de magnésio em solução nutritiva para o capim-Mombaça**. 2001. 128 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PIEKIELEK, W.P.; FOX, R.F. Use of chlorophyll meter to predict sidedress N requirements for maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 59-65, 1992.

PÖTTKER, D.; FABRÍCIO, A.C.; NAKAYAMA, L.H.I. Doses e métodos de aplicação de nitrogênio para a cultura do trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, p. 1197-1201, 1984.

PÖTTKER, D.; ROMAN, E. Efeito de resíduos de cultura e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 5, p. 763-770, 1994.

PÖTTKER, D.; ROMAN, E.S. Efeito do nitrogênio em trigo cultivado após diferentes sucessões de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 5, p. 501-507, 1998. Número especial.

PREZOTTI, L.C.; DEFELIPO, B.V. Formas de potássio em solos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 109-114, 1987.

PRIMAVESI, A. A.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A. G. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 247-253, 2005.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1981. 142 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 284 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico).

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357-363, 1999.

REEVES, D.W.; MASK, P.L.; WOOD, C.W.; DELANEY, D.P. Determination of wheat nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter: influence of management practices. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 16, n. 5, p. 781-796, 1993.

REICHENBACH, H.G. van. Factores of mica transformation. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNACIONAL POTASH INSTITUTE, 9., 1972, Landshut. **Proceedings...** Bern: International Potash Institute, 1972. p. 33-42.

REIS, A.R.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. **Bragantia**, Campinas, v.65, n. 1, p. 163-171, 2006.

REIS, M. S.; SOARES, A. A.; SOARES, P. C.; CORNÉLIO, V. M. O. Absorção de N, P, K, Ca, Mg e S pelo arroz irrigado influenciada pela adubação nitrogenada. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 707-713, 2005.

RHEINHEIMER, D.S.; ALVAREZ, J.W.R.; OSORIO FILHO, B.D.; SILVA, L.S.; BORTOLUZZI, E.C. Crop responses for sulphur application and sulfate levels in a sandy soil under no-tillage. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 562-569, 2005.

ROSOLEM, C.A. Interação de potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 2005. p. 239-256.

ROSOLEM, C.A.; BESSA, A.M.; PEREIRA, H.F.M. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 9, p. 1045-1054, 1993.

RUAN, J.; WU, X.; YE, Y.; HARDTER, R. Effect of potassium, magnesium and sulphur applied in different form of fertilizers on free amino acid content in leaves of tea (*Camellia sinensis* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 76, p. 389-396, 1998.

RUAN, J.; WU, X.; HARDTER, R. Effects of potassium and magnesium nutrition on the quality components of diffents types of tea. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 79, p. 47-52, 1999.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; SILVA, O.F.; MELO, M.L.B. Resposta do feijoeiro ao manejo de nitrogênio em várzeas tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1265-1271, 2003.

SANTOS, A.R. **Diagnose nutricional e respostas do capim-Braquiária submetido a doses de nitrogênio e enxofre**. 1997. 115 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

SANTOS JUNIOR, J.D.G.; MONTEIRO, F.A. Nutrição em nitrogênio do capim-Marandu submetido a doses de nitrogênio e idades de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 60, p. 139-146, 2003.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT: user's guide**, version 8.0. Cary:SAS Institute 2000.

SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VIGIL, M.; BELOW, F.E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 23, p. 2173-2187, 1992.

SCHERER, H.W.; MACKOWN, C.T.; LEGGETT, J.E. Potassium-ammonium uptake interactions in Tobacco seedlings. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 35, p. 1060-1070, 1984.

SHADCHINA, T.M.; DMITRIEVA, V.V. Leaf chlorophyll content as a possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, p. 1427-1437, 1995.

SILVA, A.A ; MATTOS, W.T.; SANTOS, A.R. Potássio e sódio em capim-Tanzânia cultivado em solução nutritiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBCS, 1995. p. 284.

SILVA, M.A.G.; BOARETTO, A.E.; MELO, A.M.T.; FERNANDES, H.M.G.; SCIVITTARO, W.B. Rendimento e qualidade de frutos de pimentão cultivado em ambiente protegido em função do nitrogênio e potássio aplicados em cobertura. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, 1999.

SILVEIRA, C.P. **Produção e nutrição mineral do capim-Tanzânia com variável disponibilidade de nitrogênio e cálcio**. 2005. 87 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SINGH, B.; GOULDING, K.W.T. Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil the Broadbalk Continuous wheat experiment at Rothamsted. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 651-659, 1997.

SINGH, M.; SINGH, V.P.; REDDY, D.D. Potassium balance and release kinetics under continuous rice-wheat cropping system in Vertisol. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 77, p. 81-91, 2002.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 129-145.

SPARKS, D.L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMMER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 38-53.

SRIVASTAVA, H.S. Regulation of nitrate reductase activity in higher plants. **Phytochemistry**, New York, v. 19, p. 725-733, 1990.

STANCHEVA, I.; DIVEV, N. Response of wheat and maize to different nitrogen sources: II. Nitrate reductase and glutamine synthetase enzyme activities, and plastid pigment content. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, p. 1281-1290, 1995.

STROMBERGER, J.A.; TSAI, C.Y.; HUBER, D.M. Interactions of potassium with nitrogen and their influence on growth and yield potential in maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, n. 1, p. 19-37, 1994.

SUBASINGHE, R. Effects of nitrogen and potassium stress and cultivar differences on potassium ions and nitrate uptake in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 809-825, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 792 p.

TURNER, F.T.; JUND, M.F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice. **Agronomy Journal**, Madison, v.83, p. 926-928, 1991.

USHERWOOD, N.R. Interação do Potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI, O.; USHERWOOD, N.R. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fósforo; Instituto Internacional da Potassa; Fundação Iapar, 1982. p. 227-247.

VENKATESAN, S.; GANAPATHY, M.N.K. Nitrate reductase activity in tea as influenced by various levels of nitrogen and potassium fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, p. 1283-1291, 2004.

VIEIRA, R.D.; FORNASIERI FILHO, D.; MINOHARA, L.; BERGAMASCHI, M.C.M. Efeito de doses e de épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na produção e na qualidade fisiológica de sementes de trigo. **Científica**, São Paulo, v. 23, n.2, p. 257-264, 1995.

WALLEY, F.; YATES, T.; GROENIGEN, J.W. van; KESSEL, C. van. Relationships between soil nitrogen availability indices, yield, and nitrogen accumulation of wheat. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1549-1561, 2002.

WIETHOLTER, S. Fósforo no solo e a cultura do trigo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fósforo; Instituto Internacional da Potassa, Piracicaba, 2004. p. 726.

WRIGLEY, C.W.; DU CROS, D.L.; FULLINGTON, J.G.; KASARDA, D.D. Changes in polypeptide composition and grain quality due to sulphur deficiency in wheat. **Journal of Cereal Science**, London, v. 2, p. 15-24, 1984.

XU, G.; WOLF, S.; KAFKAFI, U. Ammonium on potassium interaction in sweet pepper. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 25, n. 4, p. 719-734, 2002.

XU, Q. F.; TSAI, C.E.; TSAI, C.Y. Interaction of potassium with the form and amount of nitrogen nutrition on growth and nitrogen uptake of maize. **Journal Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 1, p. 23-33, 1992.

XU, Y.C.; ZHAO, B.L. The main origin of endogenous NO in higher non-leguminous plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v.41, p. 833-838, 2003.

YANO, G.T.; TAKAHASHI, H.W.; WATANABE, T.S. Avaliação de fontes de nitrogênio e épocas de aplicação em cobertura para o cultivo do trigo. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 2, p. 141-148, 2005.

ZENG, Q.; BROWN, P.H. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 221, p. 121-134, 2000.

ZSOLDOS, F.; HAUNOLD, E.; HERGER, P.; VASHEGYI, A. Effects of sulfate and nitrate on K⁺ uptake and growth of wheat and cucumber. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v. 80, p. 425-430, 1990.