

SELMA ALVES ABRAHÃO

RESPOSTA ESPECTRAL DO CAPIM-TANZÂNIA À ADUBAÇÃO
NITROGENADA E DENSIDADES DE PLANTIO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A159r
2007

Abrahão, Selma Alves, 1980-

Resposta espectral do capim-tanzânia à adubação nitrogenada e densidades de plantio / Selma Alves Abrahão. – Viçosa, MG, 2007.
xi, 70f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 56-64.

1. Agricultura de precisão. 2. Plantas forrageiras - Adubos e fertilizantes. 3. Fertilizantes nitrogenados. 4. Sensoriamento remoto. 5. Pastagens - Manejo.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.3

SELMA ALVES ABRAHÃO

RESPOSTA ESPECTRAL DO CAPIM-TANZÂNIA À ADUBAÇÃO
NITROGENADA E DENSIDADES DE PLANTIO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 20 de março de 2007.


Prof. Daniel Marçal de Queiroz
(Co-Orientador)


Prof. Dilermando Miranda da
Fonseca


Prof. Ricardo Capúcio de Resende


Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho


Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

Ao meu pai Haroldo Ferreira Abrahão (*in memoriam*), pela confiança, dedicação e incentivo. Foi e deixou a melhor herança... meus estudos.

DEDICO

À Deus, pelas bênçãos concedidas na minha vida.

À minha mãe Regina, pelo amor incondicional.

Às minhas irmãs Cynthia, Sandra e Karen, pelo amor e amizade.

Ao meu sobrinho Sávio, pela alegria.

Ao meu cunhado Carlos, pelo incentivo e amizade.

Ao Mário, por toda paciência e carinho.

AGRADEÇO

“Não é a mais forte das espécies que sobrevive, nem a mais inteligente, mas aquela que melhor responde às mudanças.”

Charles Darwin

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela confiança, orientação e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos e suporte financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte financeiro.

Aos Professores Daniel Marçal de Queiroz, José Marinaldo Gleriani e Nerilson Terra Santos, pela colaboração nas atividades de pesquisa e amizade.

Ao departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa, em especial ao professor Dilermando, pela concessão da área experimental, conhecimentos transmitidos e amizade.

Ao Sr. Nicolau, pelo auxílio na condução do experimento e amizade.

Aos estagiários da Mecanização Agrícola, Adriano, Bruno, Mateus e Shimamura, pela amizade e colaboração no desenvolvimento do experimento.

Ao Marcelo, pela construção dos equipamentos e amizade.

Ao Enrique, pela amizade, conselhos e disponibilidade em todos os momentos.

Às amigas desenvolvidas, Alisson, Alcir, Andréia, Antônio, Danilo, Darly, Diogo, Élder, Everson, Douglas, Fabiane, Fábio, Francelino, Geice, Gérson, Gislaine, Guilherme, João Cléber, José Marcelo, Kelisson, Leonardo, Mário, Murilo, Natanael, Paula, Ronaldo, Sérgio, Wagner, Walter e Willian.

Aos professores Haroldo Fernandes, Luciano Baião, Mauri Teixeira, Pedro, Renato Ruas e Ricardo Capúcio de Resende, pelo auxílio e apoio.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela amizade e convívio do dia a dia.

Aos amigos, Alessandra, Francisco (Neto), Geíza e Maria José, pela amizade sincera.

BIOGRAFIA

SELMA ALVES ABRAHÃO, filha de Haroldo Ferreira Abrahão (*in memoriam*) e Regina Alves Abrahão, nasceu em Ipatinga, MG, no dia 24 de março de 1980.

Em janeiro de 2005 conclui o curso de Engenharia de Agrimensura na Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2005 iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa e submeteu-se à defesa de dissertação em março de 2007.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. Caracterização das pastagens no Brasil.....	4
2.2. Nitrogênio e a produtividade da planta forrageira	5
2.3. Agricultura de precisão e sensoriamento remoto.....	7
2.3.1. Radiometria de campo.....	9
2.3.2. Comportamento espectral das culturas agrícolas	12
2.3.3. Fatores que influenciam a resposta espectral dos alvos agrícolas.....	14
2.3.4. Índices de vegetação para a agricultura de precisão.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1. Histórico da área	20
3.2. Implantação do experimento.....	21
3.3. Medidas de reflectância espectral.....	23
3.4. Estimativas do teor de clorofila foliar.....	26
3.5. Determinação do teor de nitrogênio foliar	26
3.6. Determinação da produção de massa seca (MS)	26
3.7. Análises Estatísticas	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Estudo do comportamento espectral do capim-tanzânia em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio	29
4.2. Estudo do teor de nitrogênio foliar em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio	34
4.3. Estudo dos índices de vegetação em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio	38
4.4. Análise da correlação entre os índices de vegetação e valores SPAD	51

4.5. Análise da correlação entre os índices de vegetação e a massa seca (MS)	52
5. CONCLUSÕES	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
7. APÊNDICES	65
Apêndice A	65
Apêndice B	66
Apêndice C	67
Apêndice D	68

RESUMO

ABRAHÃO, Selma Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2007. **Resposta espectral do capim-tanzânia à adubação nitrogenada e densidades de plantio.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-Orientadores: Daniel Marçal de Queiroz, José Marinaldo Gleriani e Nerilson Terra Santos.

O uso de aplicação à taxa variável de nitrogênio é mais eficiente, evitando as perdas, especialmente por lixiviação. Tendo em vista que seja possível discriminar as doses de nitrogênio a partir da resposta espectral do dossel das forrageiras, torna-se necessário o conhecimento do efeito dessa variável sobre a resposta espectral da cultura. Com a presente pesquisa objetivou-se avaliar o efeito de quatro doses de nitrogênio (0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹) e três densidades de plantio (9, 25 e 49 plantas m⁻²) na resposta espectral do dossel do *Panicum maximum* cv. Tanzânia, nas correlações entre índices de vegetação (NDVI, VARI_{RedEdge}, VARI_{Green}, WDRVI_(0,05), WDRVI_(0,1) e WDRVI_(0,2)) e medições de clorofila (valores SPAD) e massa seca (MS). O experimento foi conduzido com os tratamentos arranjados num fatorial quatro doses de N e três densidades de plantio, segundo o delineamento em blocos casualizados, no Setor de Forragicultura do Departamento de Zootecnia da UFV, em Viçosa-MG, no período de novembro de 2006 a janeiro de 2007. Foram realizadas quatro avaliações em campo, com dois espectrorradiômetros SD2000, utilizados para obterem dados espectrais nos comprimentos de onda compreendidos entre 400 e 900 nm, com a resolução espectral de 0,34 nm. Com os fatores de reflectância bidirecional determinados, simularam-se às bandas azul (460 a 480 nm), verde (545 a 565 nm), vermelho (620 a 670 nm), transição do vermelho ao infravermelho próximo (700 a 710 nm) e infravermelho próximo (840 a 880 nm) dos satélites MODIS e MERIS e, a partir destas, foram calculados os seis índices de vegetação. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que, a resposta espectral do dossel do capim-tanzânia ao longo das avaliações, tenderam em geral apresentar comportamento característico de vegetação verde. Na região do visível do espectro, houve uma tendência geral da reflectância do dossel da capim-tanzânia diminuir com o aumento das doses de nitrogênio. Enquanto na região do

infravermelho próximo, a resposta espectral foi oposta a da região do visível do espectro. A densidade de plantio, um ano após o seu estabelecimento, nas duas regiões espectrais (visível e infravermelho), não influenciou a reflectância, como também não influenciou as variáveis teor de N foliar, índices de vegetação e massa de forragem seca. Para 30 dias após o primeiro corte e 20 dias após a adubação, o $WDRVI_{(0,05)}$ foi o melhor índice para discriminar doses de nitrogênio. Para 15 dias após o segundo corte e 13 dias após a primeira parcela da adubação, o $VARI_{RedEdge}$ foi o melhor índice para discriminar doses de nitrogênio. Para 26 dias após o segundo corte e 11 dias após a segunda parcela da adubação, os índices $VARI_{RedEdge}$ e $WDRVI_{(0,05)}$ foram os melhores para discriminar doses de nitrogênio. Os resultados indicaram que não houve tendência de um mesmo índice sobressair para discriminar as doses de N aplicadas em relação aos outros para as datas estudadas. Para as todas datas de avaliação, o índice que tem maior correlação com os valores de SPAD e MS foi o $VARI_{RedEdge}$.

ABSTRACT

ABRAHÃO, Selma Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March of 2007. **Spectral response of Tanzania grass to nitrogen fertilization and planting density.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-Advisers: Daniel Marçal de Queiroz, José Marinaldo Gleriani and Nerilson Terra Santos.

The use of variable nitrogen rate application is more efficient, avoiding losses by lixiviation. Assuming that it is possible to discriminate nitrogen rates by the spectral response of forage crops, it becomes necessary the knowledge of this variable effect on the forage spectral response. The goal of the present research was to evaluate the effect of four nitrogen rates (0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹) and three planting densities (9, 25 e 49 plants m⁻²) on the spectral response of the *Panicum maximum* cv. Tanzânia, on the correlation between the vegetation indices (NDVI, VARI_{RedEdge}, VARI_{Green}, WDRVI_(0.05), WDRVI_(0.1) e WDRVI_(0.2)) and on the chlorophyll measurements (SPAD readings) and on the dry mass (MS). The research was developed with the treatments arranged in a factorial of four N rates and three planting densities, according to the randomize block design, in the Animal Science Department of UFV, Viçosa-MG, at the Forragicultura field, from November of 2006 to January of 2007. Four data evaluations were accomplished in the field using two spectroradiometers SD2000 for spectral data sampling in 400 and 900 nm wavelengths, with spectral resolution of 0.34 nm. Using the bidirectional reflectance factors the blue (460 to 480 nm), the green (545 to 564 nm), the red (620 to 670 nm), the transition of the red to near infrared (700 to 710 nm) and the near infrared (840 to 880 nm) bands of the satellites MODIS and MERIS were simulated to calculate the six vegetation indices. In agreement with the obtained results, it was obtained that, the spectral response of the Tanzânia grass crop along the evaluations, presented a characteristic behavior of green vegetation. In the visible region, there was general tendency of the spectral reflectance of the Tanzânia grass crop to decrease with the increasing of the nitrogen rates. While in the near infrared region, the spectral response was opposed to the visible region one. The planting density, one year after its establishment, in two spectral bandwidths (visible and near infrared), did not influence the reflectance, as well as it did not

influence the following variables: N content, vegetation indices and dry mass production. For 30 days after the first cut and 20 days after the fertilizer application, the $WDRVI_{(0.05)}$ was the best index to discriminate rates of nitrogen. For 15 days after the second cut and 13 days after the first fertilizer application, the $VARI_{RedEdge}$ was the best index to discriminate rates of nitrogen. For 26 days after the second cut and 11 days after the second fertilizer application, the $WDRVI_{(0.05)}$ and $VARI_{RedEdge}$ were the best indices to discriminate rates of nitrogen. The results indicated that there was not a unique index that can be used for discriminating all the N rates applied on different dates of application. For all dates of data evaluations, the index that presented the highest correlation with SPAD values and MS was the $VARI_{RedEdge}$.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque na produção pecuária mundial, sendo o primeiro em tamanho de rebanho bovino comercial (15% do total) e o segundo maior produtor de carne bovina (EMBRAPA, 2006). Adicionalmente, o país é considerado o mais competitivo em nível internacional, sendo responsável por 20% das exportações de carne bovina do mundo (VARELLA, 2006).

Em relação ao leite, o Brasil é considerado atualmente o sétimo maior produtor de leite do mundo (EMBRAPA, 2006). Segundo estimativa da Associação Brasileira de Produtores de Leite (LEITE BRASIL, 2006), a produção no país em 2005 foi de 25 bilhões de litros de leite e mesmo assim o país importou 450 milhões de litros.

O diferencial da pecuária bovina nacional é que a principal fonte nutricional para os bovinos é o pasto, que constitui a forma mais econômica de alimentação animal (MELLO, 2002). Além disso, a importância das forrageiras na produção de bovinos no país pode ser evidenciada pela grande extensão de terra ocupada por essas, sendo de três quartos da área agrícola nacional (MARTHA JUNIOR & CORSI, 2001).

Apesar do grande potencial das forrageiras, um dos problemas enfrentados na produção de carne e leite nestes últimos anos é a degradação das pastagens, provocando o avanço da agricultura sobre as áreas antes destinadas a pastagens, deslocando a produção para regiões de solo mais pobre. Uma alternativa para os pecuaristas viabilizarem a ocupação das terras com custo mais elevado ou mesmo as áreas de solo com condições menos adequadas seria aumentar a produtividade do pasto.

Dentre as técnicas de manejo utilizadas, a adubação em pastagens, particularmente a nitrogenada, é uma das medidas fundamentais quando se pretende aumentar a produtividade do pasto, pois os solos brasileiros, em sua maioria, são deficientes em nitrogênio, que é um dos nutrientes mais limitantes no desenvolvimento das plantas (SOARES FILHO, 1993).

Entretanto, o elevado custo da adubação nitrogenada nas condições brasileiras muitas vezes limita o uso de altas doses do mesmo na tentativa de prevenir redução na produtividade. Além disso, a complexa dinâmica do

nitrogênio aplicado ao solo está sujeito a perdas como volatilização, imobilização por microorganismos e lixiviação. Tais fatos consolidam a importância de se conhecer a dose adequada de aplicação desse nutriente, capaz de maximizar economicamente o potencial de produção da forragem, evitando-se perdas e aumentando-se a eficiência desse nutriente na produção dessas pastagens.

É conhecido que no desenvolvimento de uma cultura existe uma variabilidade espacial e temporal da produtividade dentro de uma mesma área, principalmente devido à disponibilidade nutricional e às propriedades físicas e químicas do solo. Assim, determinando essa variabilidade podem-se identificar algumas causas que podem ser corrigidas em tempo hábil, aumentando assim a produtividade (DIKER & BAUSCH, 2003).

A agricultura de precisão consiste em fazer manejo a sítio específico das culturas agrícolas com base em informações obtidas localmente e que são transformadas em mapas que contêm a variabilidade espacial dos fatores de produção. Acredita-se que com a agricultura de precisão o parcelamento do adubo nitrogenado se torne uma prática essencial e recomendável para evitar as perdas, especialmente por lixiviação, e aumentar a eficiência de utilização do fertilizante.

Para que a agricultura de precisão possa ser implantada com sucesso ela necessita de um maior número possível de informações, informações essas sobre a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção, como fertilidade de solo, status nutricional, variedades de cultura, pragas, entre outros. Uma das fontes de informação para a agricultura de precisão é os dados adquiridos por meio do sensoriamento remoto. O sensoriamento remoto, ao contrário dos métodos tradicionais de avaliação das culturas agrícolas, permite adquirir de forma não destrutiva dados em larga escala e em tempo real.

O uso do sensoriamento remoto para a agricultura de precisão consiste em obter por meio de sensores dados espectrais relacionados com as características agronômicas das culturas e que definem a sua variabilidade espacial. Estes dados espectrais podem ser transformados em índices de vegetação, que tem por função maximizar a variável em estudo (no caso, status nutricional) e minimizar diferentes fatores de variação, como

a arquitetura do dossel, a influência dos solos, o estágio fenológico da vegetação, a geometria de iluminação e a de visada.

Vários autores vêm trabalhando para minimizar as variações causadas por estes fatores externos, a fim melhor caracterizar a resposta espectral da cultura e permitir que os dados espectrais, por meio dos índices de vegetação, possam ser utilizados na estimativa e na análise de variáveis agronômicas da cultura (HOLBEN et al., 1980; GITELSON et al., 2002a,b, 2003; GITELSON, 2004; CUNHA, 2004).

Silva Júnior (2006) testou em seu trabalho três índices de vegetação (NDVI, GNDVI e SAVI), obtidos por meio da análise de imagens digitais aéreas, para detectar o efeito da adubação nitrogenada em *Brachiaria decumbes*, em diversos períodos após a adubação. Este autor concluiu que os índices de vegetação testados foram capazes de detectar a variação no status nutricional em todos os períodos.

Deste modo, a análise da resposta espectral do dossel das culturas agrícolas por meio da radiometria de campo pode contribuir para uma melhor compreensão das variações observadas nas imagens e também para uma maior precisão nos modelos gerados pelo sensoriamento remoto, quando utilizadas na estimativa e na análise de variáveis agronômicas da cultura. Com base neste contexto é que se enquadra a presente pesquisa, assumindo-se a hipótese de que é possível discriminar diferentes condições de estresse de nitrogênio a partir da resposta espectral do dossel das forrageiras.

Dessa forma, o objetivo geral com este trabalho foi estudar a resposta espectral do dossel de plantas forrageiras em função de diferentes doses de nitrogênio e densidades de plantio, em condições de campo.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar entre os seis índices espectrais de vegetação utilizados, o melhor para discriminar as doses de nitrogênio aplicadas.
- Estudar a correlação destes índices espectrais com massa seca e teor de clorofila.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Caracterização das pastagens no Brasil

Uma das características que tornam a atividade pecuária brasileira mais competitiva é o fato do país possuir extensas áreas de pastagens e condições adequadas para o seu desenvolvimento, viabilizando o atendimento da demanda mundial por alimento produzido de forma sustentada (SILVA et al., 2004). Porém, diversos autores relatam que a maior parte das áreas de pastagens no Brasil apresenta degradada ou em processo de degradação, com perda do potencial produtivo e da capacidade de suporte animal (TOWNSEND et al., 2000; MACEDO et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2001; BARCELLOS et al., 2001).

Conforme Santos (2004), o problema com a degradação tem provocado mudanças na ocupação dos solos produtivos, uma vez que a pecuária traz menor retorno no capital investido na propriedade quando comparada com a agricultura. A ocupação de áreas novas tende a ser substituída pelo aumento da produtividade da terra nas áreas já exploradas, deixando evidente que a pecuária tradicional não tem condições de competir no mercado atual (CORRÊA, 2000).

Segundo Kichel et al. (2001), a principal causa da degradação das pastagens é a redução da fertilidade do solo em razão da perda de nutrientes no processo produtivo, por exportação nos corpos e produto dos animais, erosão, lixiviação e volatilização. Os autores afirmam ainda que essas perdas podem chegar a mais de 40% do total dos nutrientes absorvidos pelo pasto em um ano de crescimento, provocando o empobrecimento contínuo do solo e a redução no crescimento das forrageiras a uma taxa de aproximadamente 6% ao ano.

Um dos principais nutrientes limitantes na produtividade das pastagens tropicais é o nitrogênio (ROCHA et al., 2002). De maneira geral, o nitrogênio influencia positivamente na produtividade (produção de massa seca) e qualidade (síntese de proteínas) das gramíneas, possibilitando assim a maior capacidade de suporte destas, e conseqüentemente

reduzindo ou evitando a degradação do pasto (FORNI et al., 2000; QUEIROZ NETO, 2001).

2.2. Nitrogênio e a produtividade da planta forrageira

De acordo com Lavres Junior (2001), o nitrogênio (N) é considerado um dos principais nutrientes de maior impacto na produtividade da planta forrageira, sendo, portanto, uma dos componentes essenciais ao manejo da pastagem em sistemas de produção de carne e leite.

Moreira et al. (2005) avaliaram a renovação de uma pastagem degradada de capim-gordura com a introdução dos capins braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf. cv. Basilisk) e jaraguá (*Hyparrhenia rufa* (Ness) Stapf.) adubados com quatro doses de nitrogênio (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) ou em consórcios com estilosantes (*Stylosanthes guianensis* (Aubl.) Swartz cv. Mineirão), em duas colheitas. Os resultados demonstraram uma resposta linear da produtividade do capim-braquiária em relação à adubação nitrogenada nas duas colheitas, porém não houve resposta do capim-jaraguá. Houve também uma resposta linear da qualidade do capim-jaraguá em relação a adubação nitrogenada nas duas colheitas, enquanto o capim-braquiária apresentou resposta só na primeira colheita.

Estudando os efeitos das doses de nitrogênio (28, 112, 210, 294 e 378 mg L⁻¹, em solução nutritiva) e idades de crescimento (21, 28, 35, 42, 49 e 56 dias após a emergência) nos atributos nutricionais e de crescimento da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, Santos Júnior et al. (2003) observaram que as doses de nitrogênio e as idades de crescimento interagiram significativamente em todos os atributos estudados. Segundo os autores, entre os nutrientes, o nitrogênio destacou-se pelo incremento na produção de forragem, sendo que as doses de nitrogênio necessárias para a obtenção da máxima produção variaram linearmente de 257 a 304 mg L⁻¹.

Freitas et al. (2005) avaliaram o efeito de diferentes doses de N na produção de massa seca do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.), na conversão do nitrogênio e concentração desse nutriente no tecido da planta. Foram testadas quatro doses de nitrogênio (70, 140, 210 e 280 kg ha⁻¹ ano⁻¹),

utilizando uréia como fonte do nutriente. Os autores verificaram que a maior produção de massa seca foi obtida com a aplicação de 280 kg ha⁻¹.

Segundo Herling et al. (2000), a espécie *Panicum maximum*, quando submetida à adubação nitrogenada adequada, pode alcançar produções de massa seca acima de 50 mil kg ha⁻¹ ano⁻¹. Os mesmos autores, utilizando adubação de 150 kg ha⁻¹, obtiveram 24,3 mil kg ha⁻¹ no verão e 7,4 mil kg ha⁻¹ no inverno.

Marcelino et al. (2003) estudaram a influência de tensões hídricas (35, 60, 100 e 500 kPa) e doses de nitrogênio (0, 45, 90, 180, 360 kg ha⁻¹) sobre a produção de massa seca (MS), a taxa de produção de massa seca (TPMS) e o índice de área foliar (IAF) do capim-tifton 85 (*Cynodon* spp.). As doses de nitrogênio influenciaram a produção de MS em todas as tensões, onde a maior produtividade (41,8 mil kg ha⁻¹) foi obtida na tensão de 35 kPa e na dose de 360 kg ha⁻¹ de N e menor produtividade (17,3 mil kg ha⁻¹), na tensão de 100 kPa sem adição de N. Os autores notaram ainda que nos períodos com condições climáticas favoráveis, o aumento nas doses de N aplicadas proporcionou incrementos no IAF.

Soria (2002) estudou o efeito de diferentes lâminas de água aplicada (0 a 150% da capacidade de campo) e adubação nitrogenada (0, 100, 275, 756 e 2079 kg ha⁻¹ ano⁻¹) e suas interações sobre os fatores de crescimento, produção, eficiência de uso e de qualidade da forragem buscando encontrar o nível máximo de produção e econômico de cada fator, durante nove ciclos de crescimento do *Panicum maximum* cv. Tanzânia. O aumento das doses de N dentro dos diferentes períodos de avaliação (verão, inverno e primavera) propiciou aumento na produção de massa seca total e nas concentrações de N total, N absorvido e proteína bruta. As doses de N de até 275 kg ha⁻¹ ano⁻¹ mostraram maior eficiência no uso do nitrogênio, com maior porcentagem do N recuperado (40% quando irrigado e 33% quando não irrigado).

Soria (2002) observou que doses de N superiores a 756 kg ha⁻¹ ano⁻¹ não proporcionaram efeitos crescentes sobre a produção de massa seca. O autor recomenda que a relação entre o preço de compra e o teor de nutriente no fertilizante deve ser o fator preponderante para aquisição do fertilizante nitrogenado para adubação de pastagem de capim-tanzânia.

Por outro lado, o efeito negativo do excesso de nitrogênio para o desenvolvimento vegetal, tem por sua vez sido notado por vários autores. Assim, Vicente-Chandler et al. (1962), ao trabalhar com doses de N de até 1793 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em *Panicum maximum*, afirmaram que doses de nitrogênio superiores a 600 kg ha⁻¹ ano⁻¹, provocam a diminuição na quantidade do nutriente recuperado pela planta, em decorrência da maior desnitrificação do nutriente, bem como a indução de toxidez na planta provocada pelo excesso de N. Da mesma forma, Wilson e Mannelje (1978), ao estudar pastagens de *Cenchrus ciliaris* cv. Biloela (capim-buffel) e *P. maximum* var. *trichoglume* cv. Petri (Green Panic) na Austrália, constataram que fatores como excesso de nitrogênio ou períodos de estresses hídricos contribuem e muito para o aumento da senescência das plantas.

Desse modo, é preciso conhecer a dose adequada de aplicação desse nutriente, capaz de maximizar economicamente o potencial de produção da forragem, evitando-se perdas e aumentando-se a eficiência desse nutriente na produtividade das gramíneas e, conseqüentemente, na produção animal.

2.3. Agricultura de precisão e sensoriamento remoto

A agricultura de precisão é uma tecnologia em desenvolvimento que se apresenta como alternativa à agricultura convencional. Pode ser considerada como um sistema de gerenciamento a sítio específico da atividade agrícola com base em informações de mapas que contém a variabilidade espacial e ou temporal da produção e dos fatores a ela relacionados, tendo como objetivo aumentar a eficiência do processo produtivo (QUEIROZ et al., 2000).

Neste sistema as decisões são tomadas com base no requerimento de pequenas subdivisões homogêneas da área total. Cada subdivisão é tratada conforme suas necessidades específicas, desta forma o desperdício e o impacto ambiental produzido pela agricultura são minimizados (YANG & ANDERSON, 1999).

Segundo Stafford (2000), a agricultura de precisão necessita de um grande número de informações que só será possível com os avanços

obtidos no processamento computacional. Esse mesmo autor ressalta que existe ainda a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias, particularmente na área de sistemas de sensoriamento e mapeamento antes que a agricultura de precisão seja praticada de maneira generalizada.

Um dos grandes avanços na aquisição de informações para mapear variabilidade da cultura para a agricultura de precisão está no desenvolvimento de sensores monitores de produtividade de grãos instalados em colhedoras equipadas com receptores de sinais GPS (Sistema de Posicionamento Global). Entretanto, os monitores de colheita podem resultar erros significantes na estimativa de produtividade devido a sua resolução grosseira, variações de velocidade da colhedora, ruído induzido pela vibração da máquina e variação do terreno (LAMB et al., 1995). Além disso, a colheita apresenta uma amostragem destrutiva e tardia sob o ponto de vista de intervenção do manejo da cultura ainda durante seu ciclo e é uma prática restrita somente a área cultivada, uma vez que não se pode fazer uma extrapolação dos resultados obtidos para outras áreas adjacentes (YANG & ANDERSON, 1999).

Neste contexto, o sensoriamento remoto tem se mostrado ser uma das técnicas mais promissoras para a agricultura de precisão (ANDERSON et al., 1999). Segundo Meneses (2001), o sensoriamento remoto pode ser definido, de maneira simples e usual, como uma técnica de aquisição de informações dos objetos existentes na superfície terrestre, sem que haja contato físico direto com o mesmo. Essas informações podem ser adquiridas em níveis: aéreo, terrestre e orbital, de acordo com a distância entre o objeto de interesse e o sensor (MATHER, 1994).

A aplicação das técnicas de sensoriamento remoto para a agricultura de precisão consiste em obter com a devida precisão informações que definem a variabilidade e que normalmente dizem respeito à cultura e ao solo (MOLIN, 1997). Segundo Santos Junior et al. (2001), o sensoriamento remoto, além de dispensar a coleta e o processamento de amostras em laboratório, permite levantamentos precisos e confiáveis, em curto espaço de tempo, independentemente do tamanho da área em questão.

Nos últimos anos foram criados os sistemas de sensores hiperespectrais, planejados para operarem com centenas de bandas,

permitindo que os objetos possam ser identificados ou mesmo discriminados por meio de suas diferenças de reflectâncias. Dessa forma, para a interpretação de imagens hiperespectrais é essencial primeiro conhecer os padrões de respostas de reflectância dos diferentes tipos de objetos, obtidos por meio de medidas radiométricas (MENESES, 2001).

Pesquisadores vêm estudando maneiras de se identificar o estado nutricional com relação ao nitrogênio em diversas culturas, utilizando técnicas de sensoriamento remoto (BAUSCH & DUKE, 1996; GOPALAPILLAI et al., 1998; BOEGH et al., 2002; HABOUDANE et al., 2002; GOEL et al., 2003; MUTANGA et al., 2003; SILVA JÚNIOR, 2006).

Fonseca et al. (2002) realizaram medidas radiométricas em campo para analisar a resposta espectral do *Paspalum notatum* crescendo sob diferentes doses de adubo nitrogenado (0, 200 e 400 kg ha⁻¹). Os autores verificaram que a resposta espectral do dossel da forrageira foi alterada pelas variações na produção de massa seca, provocadas por diferenças nas doses de adubo nitrogenado. Os aumentos na quantidade de massa seca provocaram diminuição da reflectância na região do visível do espectro e aumento na região do infravermelho, o que mostra que a análise da reflectância é um bom indicador das mudanças que ocorrem em um dossel.

Mutanga et al. (2003) utilizaram medidas radiométricas com alta resolução espectral para identificar diferenças na concentração de nitrogênio em forrageira tropical cultivada em casa de vegetação. Os resultados mostraram diferenças significativas em determinados comprimentos de onda. De acordo com os autores esses resultados indicam a possibilidade de mapeamento da variabilidade da qualidade em pastagens utilizando-se sensoriamento remoto hiperespectral.

2.3.1. Radiometria de campo

A radiometria de campo é uma técnica de fundamental importância para o sensoriamento remoto (MILTON, 1987). Pois, por meio das medidas radiométricas em laboratório ou em campo que se conhecem com qual intensidade cada objeto reflete a radiação eletromagnética nos diferentes

comprimentos de onda do espectro, permitindo explicar e entender como cada objeto irá aparecer nas imagens (MENESES, 2001).

Segundo Milton (1987), a radiometria atua no mínimo em três áreas do sensoriamento remoto, sendo que primeiro, atua ligando as medidas de laboratório e condições de campo para calibração de sensores orbitais e aerotransportados, segundo, na predição de bandas espectrais ótimas e na configuração de visadas e horários para as realizações das tarefas de sensoriamento remoto, e terceiro, no desenvolvimento, refinamento e teste de modelos que relacionam atributos biofísicos para dados de sensoriamento remoto.

Na agricultura, as medidas radiométricas em campo são frequentemente utilizadas em estudos que relacionam a radiação solar refletida pelas culturas com as variáveis agronômicas (DEERING, 1989). Esta técnica permite obter medidas ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas, minimizando os efeitos atmosféricos e permitindo um maior controle das variáveis que influenciam as propriedades ópticas do objeto (ANTUNES, 1999).

A reflectância de uma superfície é definida como a razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente sobre essa superfície (NICODEMUS et al., 1977). Segundo Milton (1987), ignorando a radiação difusa e supondo que os ângulos sólidos de incidência e reflexão sejam suficientemente pequenos, a reflectância de um alvo é expressa pela Equação 1.

$$f(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) = \frac{\Delta(\theta_r, \Phi_r)}{E(\theta_i, \Phi_i)} \quad (1)$$

Em que,

- f : Reflectância de um alvo;
- Δ : Radiância refletida por unidade de ângulo sólido;
- E : Irradiância por unidade de ângulo sólido;
- θ : Ângulo zenital; e
- Φ : Ângulo azimutal.

Os subscritos i e r descrevem raios incidentes e refletidos, respectivamente.

Segundo o mesmo autor, a radiância e irradiância variam em zênite e azimute, desta forma, para especificar completamente o campo de reflectância para um objeto, a reflectância precisa ser medida em todas possíveis posições fonte ou sensor, resultando na função de distribuição de reflectância bidirecional, Figura 1.

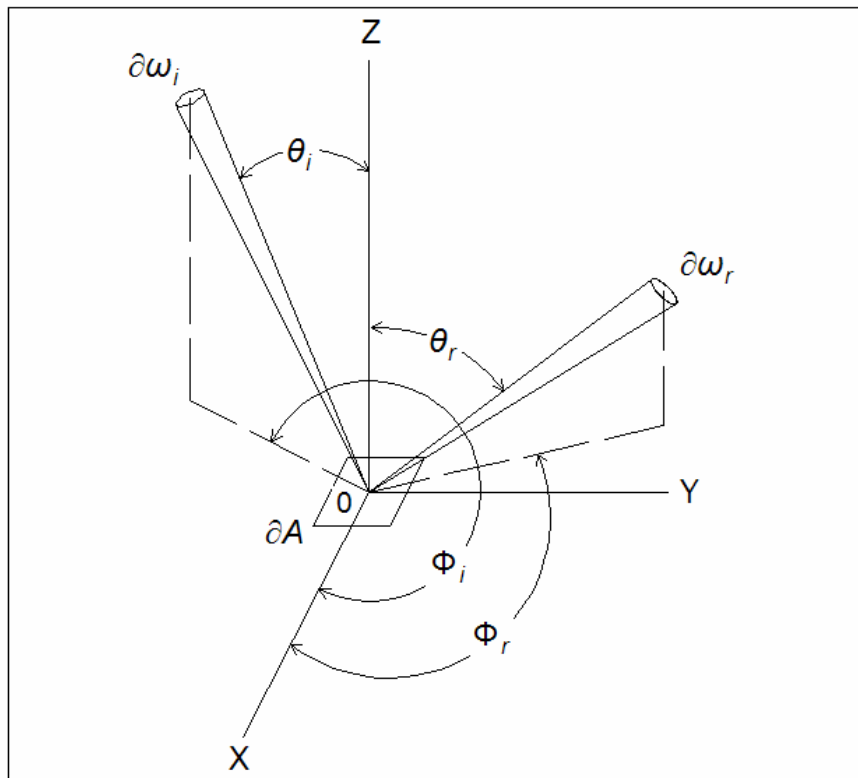


Figura 1 - Geometria da radiação em condições de campo, em que os subscritos i e r são os fluxos incidentes e refletidos; $\partial\omega$, o ângulo sólido; ∂A , a área amostrada; θ , o ângulo azimutal; e Φ , o ângulo zenital em relação ao eixo Z, perpendicular à área amostrada. FONTE: Nicodemus et al. (1977), p. 6.

Entretanto, segundo Milton (1987), no ambiente em campo, a medida da irradiância na superfície de um objeto não é possível. Uma alternativa é monitorar a irradiação direta usando um sensor espectral com visada para cima com um receptor com correção de cosseno, ou seja, um sensor que não mostra dependência no ângulo zênite ou azimute do fluxo incidente. Esta configuração de medida pode ser chamada cosseno cônico para indicar que o alvo é medido usando um receptor de abertura, conforme Equação 2.

$$R(\theta_i, \Phi_i; \theta_r, \Phi_r) = \frac{L(\theta_r, \Phi_r)}{\Xi(2\pi)} k(\theta_i, \Phi_i; 0,0) \quad (2)$$

Em que,

- R : Fator de reflectância bidirecional;
- E_r : Irradiância medida pelo receptor com correção de cosseno;
- L_r : Radiância refletida por unidade de ângulo sólido;
- K : Fator de correção que relaciona a irradiância medida pelo receptor com correção de cosseno e a radiância de um painel branco perfeitamente difuso.

2.3.2. Comportamento espectral das culturas agrícolas

Desde a descoberta de que os vegetais extraem da radiação emitida pelo sol a energia que necessitam para sobreviver, o estudo da interação entre essa radiação e a vegetação passou ser fundamental para a interpretação de dados de sensoriamento remoto, bem como para o desenvolvimento de novos sensores e metodologias de análise. Este conhecimento é caracterizado como comportamento espectral da vegetação, e inclui a reflectância como fenômeno mais analisado (PONZONI, 2001).

Segundo este autor, o dossel vegetal é constituído por folhas, caules, flores, ou seja, todas as partes que compõe uma planta. Entretanto, a interação da radiação solar com dosséis vegetativos é realizada, principalmente, por meio dos pigmentos contidos nas folhas.

Desta forma, o comportamento espectral do dossel vegetal se manifesta de forma semelhante a uma folha verde sadia, distintas em três regiões espectrais, que são as regiões do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio (Figura 2).

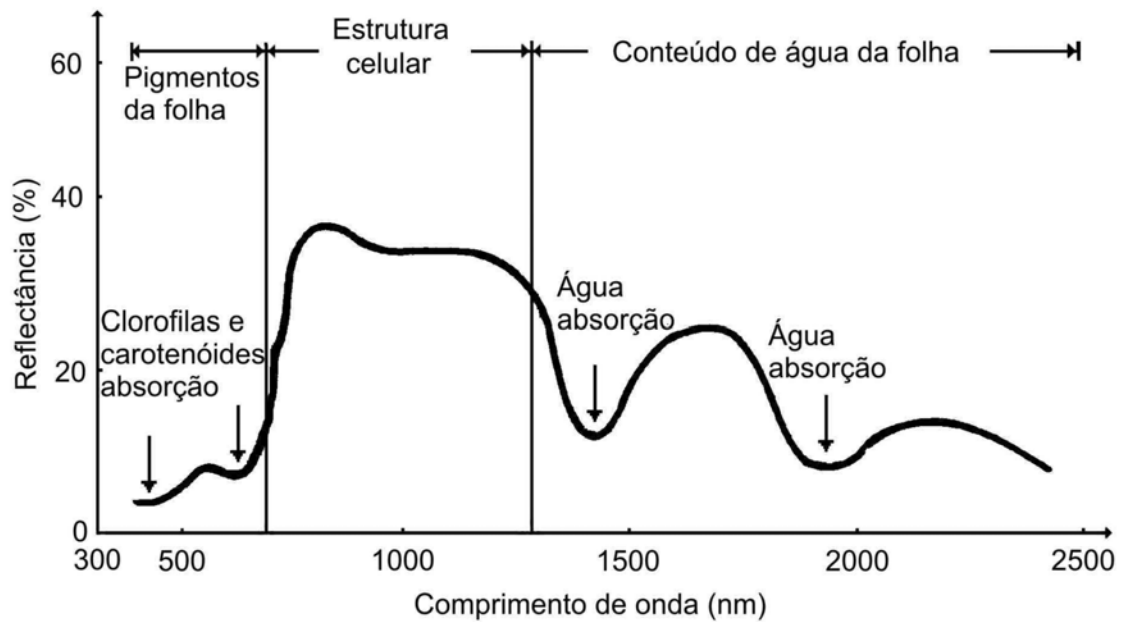


Figura 2 – Resposta espectral típica de uma folha de vegetação verde e sadia. FONTE: Novo (1992).

A região do visível compreende toda radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 a 700 nm. Nesta região, a maior parte da radiação que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes das folhas. Os pigmentos que mais influenciam a reflectância são as clorofilas a e b, com dois picos de absorção, o maior no comprimento de onda de 680 nm e o menor no comprimento de onda de 480 nm, respectivamente (MOREIRA, 2003).

A região do infravermelho próximo compreende toda radiação eletromagnética cuja faixa espectral situa-se entre 700 e 1300 nm. Nesta região, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é dominado pelas propriedades ópticas das folhas que dependem das estruturas celulares internas (MOREIRA, 2003). Dependendo da estrutura anatômica das folhas, a reflectância pode chegar até 50% e a absorção, menos que 15% (TUCKER & GARATT, 1977).

Além disso, nesta região, existe uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha, a qual preenche as cavidades de ar, formando um meio líquido no interior da folha. Com isso, ocorre uma diminuição das diferenças no índice de refração do ar e da parede celular hidratada da folha, aumentando a transmitância desta (MOREIRA, 2003).

2.3.3. Fatores que influenciam a resposta espectral dos alvos agrícolas

São diversos os fatores envolvidos na interceptação, absorção e reflexão da radiação solar pelas folhas. Segundo Bernardes (1987), estes fatores podem ser classificados como morfológicos e fisiológicos.

Entre os fatores morfológicos, os mais importantes estão relacionados à organização espacial das folhas, como a densidade de cobertura vegetal, distribuição horizontal e vertical das folhas e ângulo de inserção foliar.

O índice de área foliar (IAF) é uma das principais características para estimar a cobertura vegetal, que é determinado pela relação entre a área foliar da planta e a área disponível à planta. Segundo Asrar et al. (1985), o IAF está fortemente relacionado com a capacidade do dossel em interceptar radiação fotossinteticamente ativa. Portanto, o IAF está correlacionado com a fotossíntese do dossel e com o acúmulo de massa seca, em situações onde não predomina o estresse nutricional.

Nas culturas agrícolas, em geral, da fase inicial de seu crescimento até o estágio de completa interceptação da radiação pelas folhas, a taxa de produção de fotossintetizados aumenta em função do aumento do IAF. Entretanto, a absorção da radiação não aumenta indefinidamente com o aumento do IAF, sendo limitada pelo auto-sombreamento que as folhas superiores exercem sobre as inferiores (MOREIRA, 2003).

A distribuição horizontal das folhas refere-se a quanto do solo elas cobrirão. Com a cobertura total de uma área de solo, toda energia fotossinteticamente ativa que incide nessa área seria absorvida. Entretanto, o arranjo das folhas depende da densidade de plantio e da disposição das plantas na área, ou seja, quanto menor a densidade de plantio, menor será a área exposta (MOREIRA, 2003).

O ângulo de inserção foliar regula o grau de penetração da radiação no interior do dossel da planta. As folhas erectófilas permitem maior passagem da radiação para as partes internas do dossel, o que resulta numa distribuição da radiação solar incidente num maior número de folhas, proporcionando maior taxa de fotossíntese (MOREIRA, 2003).

Entre os fatores fisiológicos, os mais importantes estão relacionados à idade da planta, nutrientes e conteúdo de água na folha.

Em relação à idade da planta, as propriedades ópticas das folhas mudam de acordo com a sua fase de desenvolvimento. Assim, na maturação, ocorre um decréscimo da reflectância na região do visível e um acréscimo na região do infravermelho próximo, devido à existência de um maior número de espaços aéreos intercelulares no mesófilo das folhas maduras. No início da senescência, e em razão da degradação das clorofilas, ocorre uma menor absorção da radiação solar e, conseqüentemente aumento na reflectância na região do visível. Com o avanço gradativo da senescência, observa-se a degradação dos carotenos e morte das células. Nessa fase, ocorre um aumento dos espaços aéreos intercelulares das folhas, e conseqüentemente aumento da reflectância no infravermelho próximo (MOREIRA, 2003).

A deficiência de nutrientes no vegetal afeta de forma significativamente as propriedades ópticas das folhas, provocando clorose, a qual é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível, devido ao decréscimo do teor de clorofila (PONZONI, 2001).

Ripple (1986) verificou que o conteúdo de água nas folhas tem efeitos sobre a região do visível e do infravermelho próximo. Na região do infravermelho próximo, a água preenche as cavidades de ar, formando um meio líquido no interior da folha. Com isso, ocorre uma diminuição das diferenças no índice de refração do ar e da parede celular hidratada da folha, aumentando a transmitância desta (MOREIRA, 2003). Na região do visível, ocorre redução do teor de clorofila, que propicia uma menor absorção da radiação nessa região (BAUER et al., 1980; RIPPLE, 1986).

Plantas submetidas a déficit hídrico apresentam no seu interior uma série de reações bioquímicas tentando contornar a situação. Uma das conseqüências é o fechamento dos estômatos, na qual a planta perde menos água, diminuindo, porém, a taxa fotossintética devido a menor absorção de CO₂ do meio (MOREIRA, 2003). Desse modo, a reflectância é maior no vermelho e menor no infravermelho próximo.

Morelli et al. (1993) avaliaram a influência da variação da geometria de visada no comportamento espectral dos capins *Brachiaria decumbes*

Stapf. cv. Basilik e *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu. As medidas de reflectância bidirecional multiespectral (500 a 1100 nm) foram obtidas nos ângulos zenitais de 0, 15, 30, 45 e 60° para três setores do plano azimutal (0, 90 e 180°), com a variação do ângulo zenital solar controlada para uma amplitude de 10° (45-55°) e a variação azimutal solar compensada no método de aquisição. Segundo os autores, as bandas no visível foram as mais influenciadas pela variação da geometria de visada, apresentando variações azimutais e zenitais superiores às observadas para as bandas no infravermelho próximo. O máximo conteúdo de informação sobre a estrutura geométrica da vegetação está no ângulo azimutal de 180° e no ângulo zenital de 45°, que melhor se correlacionaram com a maioria das características biofísicas.

Assad et al. (1991) estudaram o comportamento espectral de quatro espécies forrageiras: *Brachiaria decumbes*, *Brachiaria humidicola*, *Brachiaria ruziziensis* e *Andropogon gayanus*, de forma a verificar possíveis diferenças em termos de reflectância espectral e sua evolução temporal. Os resultados indicaram que o estudo do comportamento espectral permite a diferenciação de espécies que apresentam arquiteturas e comportamentos fisiológicos diferentes, sendo formados dois grupos distintos: *Brachiaria humidicola* e *Andropogon gayanus* no primeiro grupo e *Brachiaria decumbes* e *Brachiaria ruziziensis* no segundo. As maiores diferenças espectrais ocorrem no período seco, face a maior sensibilidade do *Andropogon gayanus* ao estresse hídrico.

Fonseca et al. (2002) estudaram o comportamento espectral do *Paspalum notatum* crescendo sob diferentes doses de adubo nitrogenado (0, 200 e 400 kg ha⁻¹). Os autores verificaram que a resposta espectral do dossel da forrageira foi alterada pelas variações na produção de massa seca, provocadas por diferenças nas doses de adubo nitrogenado. A razão para isso consiste no fato do nitrogênio influenciar tanto a taxa de expansão, quanto à divisão celular, determinando assim o tamanho final das folhas, o que faz com que seja um dos fatores determinantes da taxa de acúmulo de fitomassa. Assim sendo, à medida que se processa o aumento das doses de adubo nitrogenado, observa-se um aumento da fitomassa do dossel, com conseqüente diminuição na reflectância em todos os comprimentos de onda

da porção visível do espectro, provocado pelo aumento da quantidade de folhas e cloroplastos para interagir com a radiação (JENSEN et al., 1990; FERNÁNDEZ et al., 1994).

O nível de nitrogênio no dossel dos pastos relacionado à reflectância também foi estudado por Mutanga et al. (2003), com bases nas características de crescimento. O crescimento das plantas foi significativamente afetado por diferentes níveis de fertilizantes, o que levou alteração na reflectância. A resposta a níveis crescentes de nitrogênio foi caracterizada por um decréscimo na reflectância na região do visível, e um acréscimo no infravermelho próximo.

2.3.4. Índices de vegetação para a agricultura de precisão

Os índices de vegetação são combinações de duas ou mais bandas espectrais obtidas das medidas radiométricas utilizados para monitorar, analisar e mapear a variabilidade espacial e temporal da vegetação, bem como suas características biofísicas (GITELSON et al., 2002a).

Diversos trabalhos têm sido observados na literatura, voltados para o desenvolvimento e avaliação de índices de vegetação para determinação das relações destes com as características biofísicas do dossel das culturas agrícolas, tais como índice de área foliar (IAF) e produtividade. Muitas destas relações são determinadas para locais específicos, sendo dependentes da variabilidade causada por fatores externos, como os efeitos das propriedades espectrais dos solos, das condições atmosféricas, do relevo, de sombreamento, da geometria de iluminação e de visada. Todavia, os índices idealizados até o momento, não os atende integralmente a todos os fatores externos. Neste sentido, tem-se procurado propor novos índices que contemplem o maior número possível desses fatores.

Em estudos realizados utilizando-se sensoriamento remoto na agricultura, tem sido comum o uso do índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), desenvolvido por Rouse et al. (1974), definido pela Equação 3.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (3)$$

Em que,

ρ_{red} : Reflectância na banda do vermelho e

ρ_{NIR} : Reflectância na banda do infravermelho próximo.

Segundo Baret et al. (1989), as bandas do vermelho e do infravermelho próximo são as mais usadas por que estão presentes em quase todos os satélites meteorológicos e de recursos terrestres e contêm mais de 90% da informação espectral da vegetação.

Cunha (2004) realizou um experimento em campo com o objetivo de avaliar o efeito das diferentes doses de adubo nitrogenado e níveis de irrigação em relação aos valores de produção de massa seca e índice de área foliar do capim-tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia), e também sobre os resultados encontrados do NDVI. O autor observou que em todo período experimental houve uma correlação significativa entre a produção de massa seca e o NDVI; também entre o índice de área foliar e NDVI, evidenciando a eficiência do índice nas estimativas dessas variáveis.

Entretanto, o NDVI não é sensível às variações da densidade da vegetação, ou seja, valores de IAF acima de dois. Isso acontece porque a reflectância na banda do vermelho diminui quase exponencialmente até atingir seu ponto de saturação, quando o IAF é igual a dois, e a reflectância na banda do infravermelho próximo continua aumentando exponencialmente até atingir seu ponto de saturação, quando o IAF é igual a seis (PONZONI, 2001). Esta limitação é devido primeiro, as escolhas da localização e largura da banda (SELLERS, 1985; YODER & WARING, 1994; GITELSON et al., 1996) e também devido a sua formulação matemática, pois o procedimento de normalização faz o NDVI insensível a variação na reflectância na banda do infravermelho próximo quando a reflectância nessa banda é muito maior que a reflectância na banda do vermelho (GITELSON, 2004).

Para corrigir esta significativa perda de sensibilidade, diferentes bandas espectrais foram incorporadas na formulação matemática do NDVI, como também foram desenvolvidos novos índices.

Gitelson et al. (2003) avaliaram na cultura do milho dois novos índices de vegetação mais precisos que o NDVI para estimar o IAF e a massa seca: o $VARI_{Green}$ (Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde) e $VARI_{RedEdge}$ (Índice de vegetação resistente à

atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho), definidos pelas Equações 4 e 5. Estes índices utilizam a reflectância da região do visível do espectro, pois nessa região a reflectância de uma planta é frequentemente menor e as diferenças entre os níveis de reflectância entre as bandas do visível são menores que entre o vermelho e o infravermelho próximo (GITELSON et al., 2002a).

$$VARI_{Green} = \frac{\rho_{green} - \rho_{red}}{\rho_{green} + \rho_{red} - \rho_{blue}} \quad (4)$$

Em que,

ρ_{green} : Reflectância na banda do verde; e

ρ_{blue} : Reflectância na banda do azul.

$$VARI_{redEdge} = \frac{\rho_{redEdge} - 1,7 \cdot \rho_{red} + 0,7 \cdot \rho_{blue}}{\rho_{redEdge} + 2,3 \cdot \rho_{red} - 1,3 \cdot \rho_{blue}} \quad (5)$$

Em que,

$\rho_{redEdge}$: Reflectância na banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo.

Gitelson (2004) propôs outro índice que é uma modificação simples do NDVI, o WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index), onde é introduzido um coeficiente de ponderação para aumentar a correlação do índice proposto com o IAF. A amplitude específica deste coeficiente depende principalmente das características do sensor e das condições de observação (GITELSON, 2004; VIÑA et al., 2004).

$$WDRVI = \frac{a \cdot \rho_{NIR} - \rho_{red}}{a \cdot \rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (6)$$

Em que,

a : Coeficiente de ponderação, valor entre 0,05 e 0,2.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Forragicultura do Departamento de Zootecnia, campus da Universidade Federal de Viçosa, cidade de Viçosa – MG, situada a uma latitude 20°45'14" Sul e uma longitude 42°52'53" Oeste, com uma altitude de aproximadamente 648 m, no período de novembro de 2006 a janeiro de 2007.

O clima da região de Viçosa, segundo a classificação de Köppen adaptada para o Brasil, é do tipo Cwb, definido como tropical de altitude, com verão brando e chuvoso e inverno frio e seco (GOLFARI, 1975). Os dados meteorológicos diários de precipitação, insolação, temperatura do ar média, umidade relativa do ar média durante o período experimental (apêndices B, C e D) foram obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa, localizada próxima ao experimento.

O experimento foi desenvolvido em área já estabelecida com a espécie forrageira *Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia, em dezembro de 2005.

3.1. Histórico da área

Na área foi realizado um experimento no período de novembro de 2005 a agosto de 2006, no qual teve como objetivo avaliar a altura do dossel do capim-tanzânia que intercepta 95 % da radiação fotossinteticamente ativa e quantificar a influência da adubação nitrogenada e da densidade de plantas no fluxo de tecido e na produção da forrageira. Utilizou-se o delineamento de blocos ao acaso, num esquema fatorial do tipo 4 x 3, ou seja, quatro doses de adubo nitrogenado aplicados em cobertura e na forma de uréia (0, 80, 160 e 320 kg de N ha⁻¹) e três densidades de plantio (9, 25 e 49 plantas m⁻²) correspondendo as taxas de 1,12, 3,08 e 6,16 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis, com três repetições. Optou-se pela semeadura da forrageira em bandejas com substrato agrícola, realizada em casa de vegetação, em 04/11/2005, onde permaneceram até as plântulas atingirem, aproximadamente, 15 cm de altura, posteriormente realizou-se o transplante, em 02/12/2006, de 9, 25 e 49 plantas m⁻², em parcelas de 9 m². A aplicação

da dose de N foi dividida em três aplicações, a primeira aplicação ocorreu 30 dias após o transplante e as outras duas aplicações ocorreram após dois cortes sucessivos. Em abril de 2006, realizou uma reaplicação das mesmas doses de adubo nitrogenado (0, 80, 160 e 320 kg ha⁻¹) que foi dividida em três aplicações realizadas após três cortes sucessivos.

3.2. Implantação do experimento

Inicialmente, foram realizadas análises químicas do solo para correção da fertilidade do mesmo, utilizando uma amostra de solo composta de 20 amostras simples, retiradas de 0 a 20 cm de profundidade (apêndice A). A partir dos resultados e corte de uniformização do capim-tanzânia foram aplicados, conforme a recomendação da 5ª aproximação, em 19/11/2006, 50 kg ha⁻¹ de superfosfato simples, distribuídos uniformemente em toda área experimental. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, com o relevo plano.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com os tratamentos combinados em um esquema fatorial do tipo 4 x 3, ou seja, quatro doses de adubo nitrogenado aplicados em cobertura e na forma de uréia (0, 80, 160 e 320 kg de N ha⁻¹) e três densidades de plantio (9, 25 e 49 plantas m⁻²), com três repetições (Tabela 1).

Tabela 1 - Tratamentos utilizados no experimento para avaliação da resposta da forragem à adubação nitrogenada em cobertura e a densidades de plantio

Tratamento	Dose de N (kg ha ⁻¹)	Densidades de plantas (plantas m ⁻²)
1	0	9
2	0	25
3	0	49
4	80	9
5	80	25
6	80	49
7	160	9
8	160	25
9	160	49
10	320	9
11	320	25
12	320	49

Foram demarcadas 36 parcelas de 3 x 3 m, sendo que entre as parcelas foi deixado um corredor de 1 m de largura (Figura 3).



Figura 3 - Foto da área experimental com as 36 parcelas.

Durante o período de desenvolvimento do experimento foram realizadas duas colheitas efetuando dois cortes das plantas a 30 cm do solo. Os cortes foram realizados utilizando uma roçadora motorizada, em 19/11/2006 e 24/12/2006, intervalo de 35 dias.

Após cada corte, as parcelas receberam a reaplicação das doses de nitrogênio pré-determinadas, sendo que as doses para cada corte foram parceladas em duas aplicações, devido à presença de uma dose de nitrogênio alta (320 kg ha^{-1}). Para o primeiro corte, a primeira parcela do adubo nitrogenado ocorreu em 22/11/2006 e a segunda parcela ocorreu em 29/11/2006, ou seja, espaçadas em sete dias. Para o segundo corte, a primeira parcela do adubo nitrogenado ocorreu em 26/12/2006 e a segunda parcela ocorreu em 08/01/2007, ou seja, espaçadas em 13 dias.

Foram realizadas quatro avaliações. Em 17/11/2006, dois dias antes do primeiro corte, foi realizada a primeira avaliação com objetivo de verificar as condições iniciais do experimento. A segunda avaliação foi realizada em 19/12/2006, 30 dias após o primeiro corte e 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado. Após o segundo corte, foram realizadas a terceira e a quarta avaliação, sendo que a terceira avaliação, em 08/01/2007, foi

realizada 15 dias após o segundo corte e 13 dias após a primeira parcela da aplicação do adubo nitrogenado. A quarta, em 19/01/2007, foi realizada 26 dias após o segundo corte e 11 dias após a segunda parcela da aplicação do adubo nitrogenado (Tabela 2).

Tabela 2 – Datas das atividades desenvolvidas durante o experimento

Período correspondente	1º parcela do adubo com N	2º parcela do adubo com N	Data das avaliações
---	---	---	17/11/2006
19/11/2006 a 19/12/2006	22/11/2006	29/11/2006	19/12/2006
24/12/2006 a 20/01/2007	26/12/2006	08/01/2007	08/01/2007* 19/01/2007

*: as parcelas desta data de avaliação receberam as seguintes doses de adubo nitrogenado 0, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹.

Devido à magnitude e distribuição adequadas de precipitação ocorridas durante o período experimental não foi necessário irrigar as plantas (apêndices B, C e D).

3.3. Medidas de reflectância espectral

As medidas de reflectância espectral foram obtidas no mesmo período, entre 11:00 e 13:00 horas, minimizando assim mudanças na geometria de iluminação (ângulo zenital solar e ângulo azimutal solar) na reflectância da cultura, sendo que para cada data de avaliação foi realizada uma única medição de reflectância espectral por parcela.

As medidas de reflectância espectral do dossel da forrageira foram feitas utilizando um sistema “dual-fiber”, com dois espectrorradiômetros, modelo SD2000 (OCEAN OPTICS, USA), utilizados para obterem dados nos comprimentos de onda compreendidos entre 400 e 900 nm, com a resolução espectral de 0,34 nm. O primeiro espectrorradiômetro equipado com uma fibra óptica com campo de visão de 25° foi apontado verticalmente para baixo para medir a radiância do dossel da forrageira. O segundo espectrorradiômetro, equipado com uma fibra óptica e um receptor com correção de cosseno (sensor que não mostra dependência no ângulo zênite ou azimute da radiação incidente) foi apontado verticalmente para cima para,

simultaneamente ao primeiro sensor, medir a irradiância do sol. Os espectrorradiômetros foram instalados em uma estrutura, de forma que as medições foram feitas a uma altura de 3,0 m, compreendendo uma área de amostragem com um diâmetro de aproximadamente 1,4 m. A posição da altura dos espectrorradiômetros sobre a forrageira foi mantida constante durante todas as épocas de desenvolvimento.

As medidas de radiância do dossel da forrageira e irradiância do sol foram intercaladas com as medidas de radiância de um painel padrão de reflectância branco, cujo espectro de reflectância é conhecido (Figura 4), simultaneamente com a irradiância do sol. O painel utilizado foi o Spectralon (LABSPHERE, USA). Esta calibração foi realizada antes da medida em cada parcela e a cada 20 minutos.

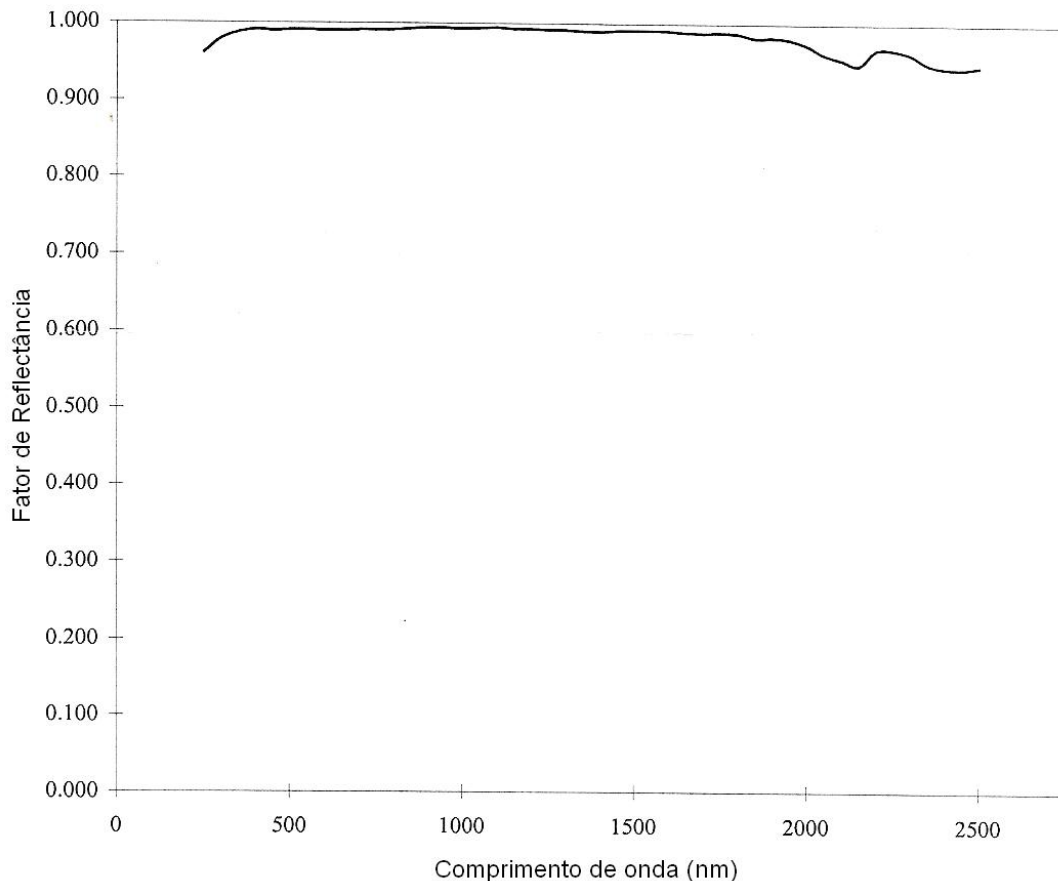


Figura 4 - Espectro do fator de reflectância do painel padrão de reflectância branco Spectralon.

O tempo de integração dos espectrorradiômetros foi automaticamente modificado de acordo com as condições de iluminação, de forma que ambos

os canais sempre estavam distribuindo uma quantia suficiente de luz para preencher a matriz do CCD entre 75% e 95%.

Conforme a metodologia proposta por GITELSON et al. (2003), a partir desses dados foi realizado o cálculo da reflectância do dossel para cada comprimento de onda (λ) de cada parcela, utilizando-se a Equação 7:

$$\rho_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}^{forrageira}}{E_{\lambda}^{inc.}} \frac{E_{\lambda}^{cal.}}{L_{\lambda}^{cal.}} 100 \rho_{\lambda}^{cal.} \quad (7)$$

Em que,

- ρ_{λ} : Reflectância do dossel no comprimento de onda λ , em %;
- $\rho_{\lambda}^{cal.}$: Fator de reflectância do painel, adimensional;
- $L_{\lambda}^{forrageira}$: Radiância da forrageira, em $W m^{-2} sr^{-1}$;†
- $L_{\lambda}^{cal.}$: Radiância do painel, em $W m^{-2} sr^{-1}$;
- $E_{\lambda}^{inc.}$: Irradiância na forrageira, em $W m^{-2}$; e
- $E_{\lambda}^{cal.}$: Irradiância no painel, em $W m^{-2}$.

O fator de reflectância do painel é introduzido na Equação 7 para corrigir a radiância do painel, pois essa medida deveria ser realizada em superfícies refletoras perfeitamente difusas, entretanto essas superfícies não existem.

Neste caso, o termo fator de reflectância bidirecional (FRB) deve ser usado, pois o valor da reflectância medido na Equação 7 dependerá dos ângulos entre a posição do sensor e a da fonte em relação à amostra.

A partir dos valores calculados do fator de reflectância bidirecional do dossel para cada comprimento de onda de cada parcela, foram calculados os valores de reflectância média, em intervalos de comprimento de onda correspondente às bandas azul (460 a 480 nm), verde (545 a 565 nm), vermelho (620 a 670 nm), transição do vermelho ao infravermelho próximo (700 a 710 nm) e infravermelho próximo (840 a 880 nm), simulando com as bandas espectrais dos satélites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) e MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer).

Com os valores das bandas foram calculados os índices de vegetação NDVI, $VARI_{Green}$, $VARI_{RedEdge}$, de acordo com as Equações 3, 4 e 5,

† sr: esterradiano, unidade de ângulo sólido (unidade suplementar do Sistema Internacional de Unidades).

respectivamente. O WDRVI (Equação 6) foi calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2), totalizando assim seis índices espectrais.

3.4. Estimativas do teor de clorofila foliar

Estimativas do teor de clorofila foliar em cada parcela foram obtidas de forma indireta utilizando-se um medidor portátil de clorofila SPAD 502, não destrutivo, nas mesmas épocas de obtenção das medidas de reflectância.

Os valores medidos pelo equipamento (valores SPAD) correspondem às medidas indiretas do teor de clorofila na folha (COSTA et al., 2001). As folhas das plantas foram posicionadas entre o emissor e o receptor do equipamento de modo que a radiação transmitida através da folha fosse convertida em sinais eletrônicos. Os valores são calculados com base na quantidade de radiação transmitida pela folha na faixa do vermelho e do infravermelho próximo (SCHEPERS et al., 1996).

Em cada parcela foram obtidos aleatoriamente 30 valores SPAD, essa medida foi efetuada diretamente na folha mais nova completamente expandida de diferentes plantas. A partir das quais foram obtidas as médias dos valores, que foi considerada como o valor SPAD da parcela.

3.5. Determinação do teor de nitrogênio foliar

As mesmas folhas utilizadas para estimar o teor de clorofila foram coletadas como amostras para determinar o teor de nitrogênio presente nas folhas. O material coletado foi identificado e depois acondicionado em sacos de papel e enviado ao Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda., Viçosa - MG, para determinação do teor total de nitrogênio.

3.6. Determinação da produção de massa seca (MS)

Ao final das avaliações no experimento (20/01/2007), foi realizada colheita da parte aérea das plantas de uma área de 1,0 m² no centro da parcela, a uma altura de 30 cm do solo. Depois do corte, a forragem foi

pesada no campo, com o objetivo de se determinar a massa verde. Dessa massa verde, foram retiradas amostras de 0,3 kg, que foram colocadas em sacos de papel identificados. Após esse procedimento foi realizado em laboratório o processo de secagem em estufa com circulação de ar forçada por 72 horas a 65°C. Por fim, procedeu-se a pesagem final para estimar a produção de massa seca, em kg ha⁻¹.

3.7. Análises Estatísticas

Com o intuito de conhecer o efeito das doses de nitrogênio e densidades de plantio sobre o teor de nitrogênio foliar foi realizada uma análise de regressão com teste para falta de ajustamento do modelo de regressão adotado, para cada data de avaliação dos dados, com nível de significância de 5%, utilizando o programa computacional Statistical Analyses System (SAS Institute, 1999). Foram analisados os seguintes modelos:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 N + \hat{\beta}_2 D + \hat{\beta}_3 (ND) \quad (8)$$

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 N + \hat{\beta}_2 N^2 + \hat{\beta}_3 D + \hat{\beta}_4 (ND) \quad (9)$$

Em que,

\hat{Y} : Variável dependente;

$\hat{\beta}_0$: Constante de regressão;

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ e $\hat{\beta}_4$: Coeficientes da regressão;

N : Variável independente doses de nitrogênio; e

D : Variável independente densidade de plantio.

A escolha do modelo (Equação 8 ou 9) foi feita com base no teste F para a falta de ajustamento, e também pela significância de seus coeficientes, testados pelo teste F, a 5% de probabilidade. Não foram testados modelos superiores ao segundo grau, por estes não representarem o fenômeno biológico da cultura, pois em geral, a resposta com a elevação de doses de N é quadrática (MESQUITA e PINTO, 2000; LUGÃO et al., 2003; SANTOS JUNIOR & MONTEIRO, 2003).

As mesmas análises foram realizadas para conhecer o efeito das doses de nitrogênio e densidades de plantio sobre os índices de vegetação utilizados.

A partir dos modelos ajustados dos índices de vegetação, foram calculados os valores máximos e mínimos do modelo para determinar o melhor índice para discriminar as doses de nitrogênio aplicadas.

Foi também realizada a análise de correlação entre os valores dos seis índices de vegetação e as demais características culturais estudadas (teor de clorofila e massa de forragem seca).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo do comportamento espectral do capim-tanzânia em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio

Realizou-se o estudo do comportamento espectral usando-se as médias da reflectância para cada dose de nitrogênio (Figuras 5, 6, 7 e 8) e para cada densidade de plantio (Figuras 9, 10, 11 e 12).

Ao se analisar as respostas espectrais do dossel do capim-tanzânia nas diferentes datas de avaliações, observou-se que as mesmas tenderam apresentar o comportamento espectral característico de vegetação verde. Na região do visível (400 a 700 nm), a reflectância do dossel da forrageira apresentou baixos valores entre os comprimentos de onda 400 e 500 nm e próximo a 680 nm, ou seja, valores de reflectância menores que 5%, e com um pico próximo a 550 nm, valores de reflectância próximos a 15%. Na região do infravermelho próximo (700 a 900 nm), a reflectância, apresentou valores próximos a 60%.

Na região do visível, para todas as datas de avaliações, houve tendência geral da reflectância espectral do dossel do capim-tanzânia em diminuir com o aumento das doses de nitrogênio (Figura 5, 6, 7 e 8). Esta resposta deve-se, provavelmente, ao aumento do teor de clorofila com o aumento das doses de nitrogênio, determinando assim uma maior absorção da radiação incidente (VIÑA et al., 2004).

Observa-se ainda nas Figuras 5, 6, 7 e 8, que no comprimento de onda em torno de 550 nm, o qual explica a percepção da cor verde da vegetação, houve uma tendência geral da reflectância espectral do dossel da forrageira em diminuir com o aumento das doses de nitrogênio. Esta resposta pode estar relacionada com o teor de clorofila que é responsável pela coloração verde das folhas e tem mostrado alta correlação com o teor de nitrogênio foliar (BOEGH et al., 2002).

Na região do infravermelho próximo, a resposta espectral observada foi oposta a da região do visível do espectro. Nessa região espectral, associado com as maiores doses de nitrogênio empregadas, encontram-se os maiores valores de reflectância espectral do dossel do capim-tanzânia.

Este efeito deve-se ao aumento no índice de área foliar com aumento das doses de nitrogênio, este fato aumenta a reflectância devido ao maior espalhamento da radiação (FONSECA et al., 2002).

Para as datas 19/12/2006 e 19/01/2007, na região do infravermelho próximo, a reflectância espectral tendeu a aumentar com o aumento das doses de nitrogênio, porém para a dose de 320 kg ha⁻¹ houve uma tendência de diminuir (Figuras 6 e 8). Essa redução na reflectância espectral para a dose mais alta pode ser explicada por possível desequilíbrio nutricional da planta com altas doses de N (DOUGHERTY & RHYKERD, 1985), que afeta diretamente e progressivamente a reflectância espectral do capim-tanzânia na região do infravermelho próximo (THOMAS et al., 1972; PONZONI, 2001).

Para a data de avaliação 08/01/2007, observou-se que a reflectância espectral do dossel do capim-tanzânia não apresentou diferenças com a variação das doses de N (Figura 7). Isso indica que aos 13 dias após a primeira parcela da dose de nitrogênio a reflectância espectral do dossel do capim-tanzânia não foi influenciada pelas variações do nutriente, assim, nesse período de crescimento as plantas ainda não apresentavam resposta espectral do dossel da forrageira significativa à adubação.

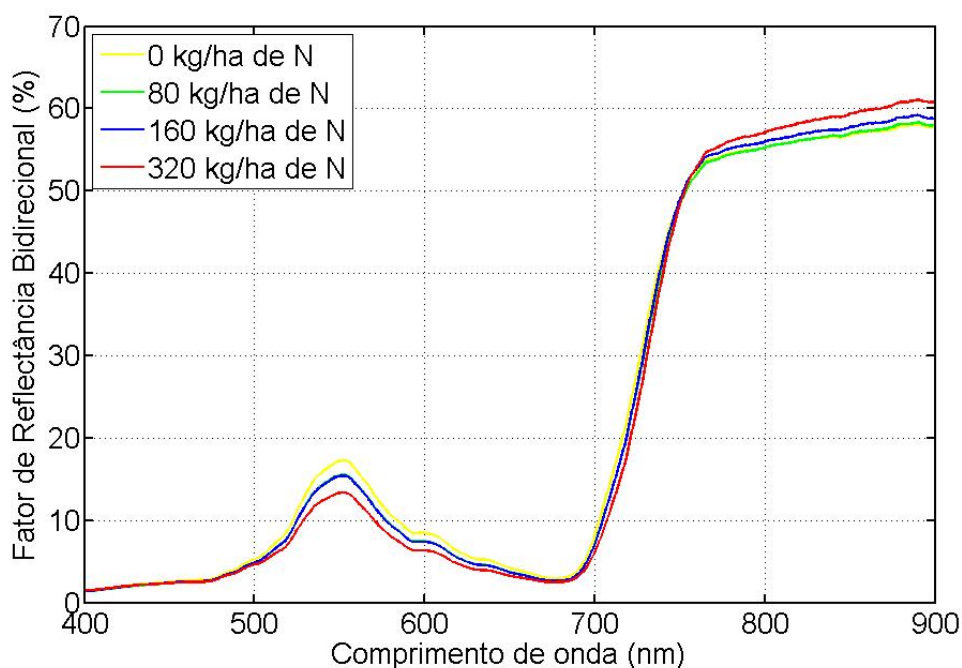


Figura 5 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes doses de N na data de avaliação 17/11/2006.

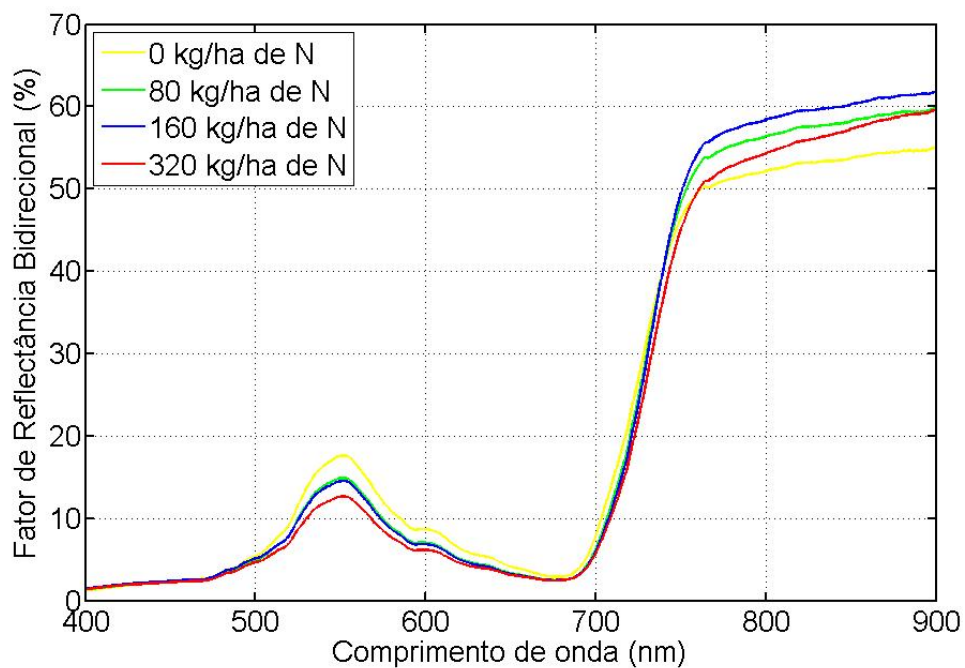


Figura 6 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes doses de N na data de avaliação 19/12/2006.

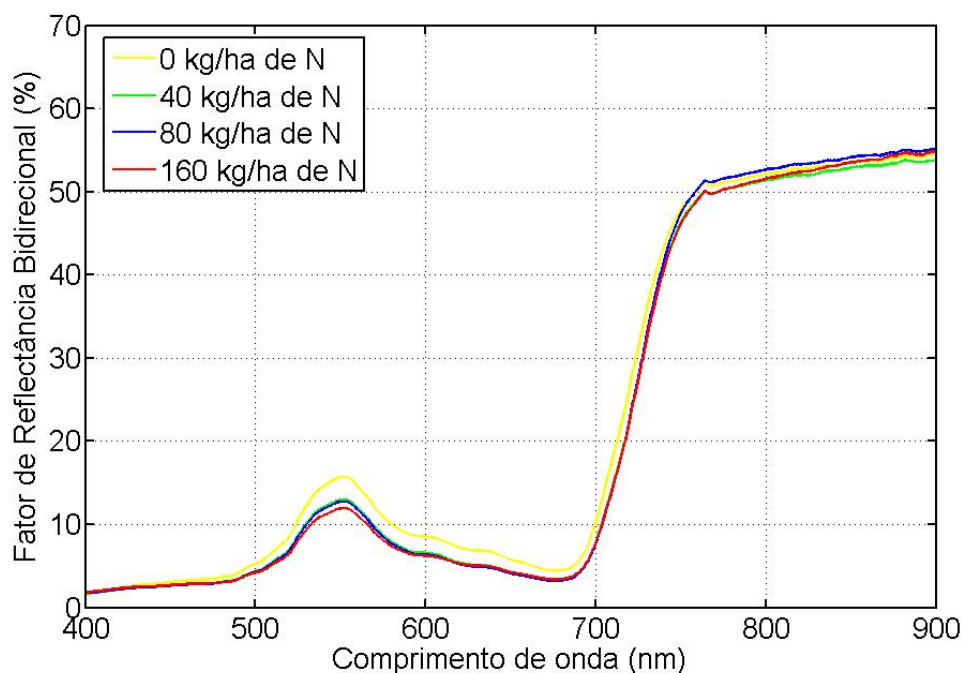


Figura 7 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes doses de N na data de avaliação 08/01/2007.

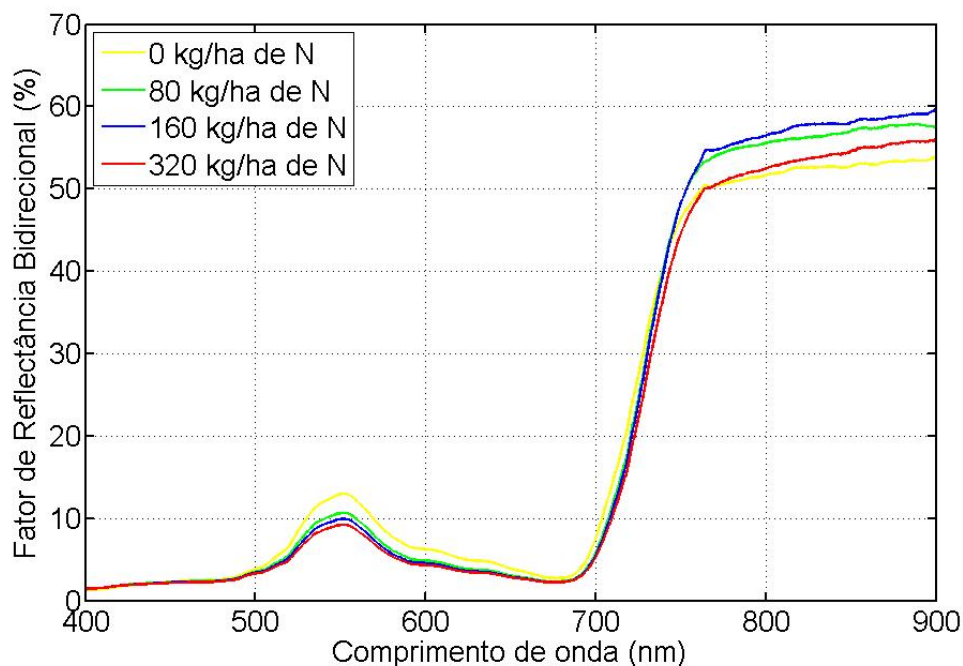


Figura 8 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes doses de N na data de avaliação 19/01/2007.

Em relação à densidade de plantio, nas duas regiões espectrais, não se observou tendência de variação da reflectância com o aumento da densidade. Isto indica que apesar das unidades experimentais terem sido submetidas a diferentes densidades de plantio, estas diferenças não tiveram influência na resposta espectral do dossel do capim-tanzânia. Isto provavelmente se deve ao fato de que com o período aproximadamente um ano após o plantio o efeito da densidade de plantas na área pode ter sido compensado pelo maior perfilhamento, o qual pode ser observado em campo (Figuras 9, 10, 11 e 12).

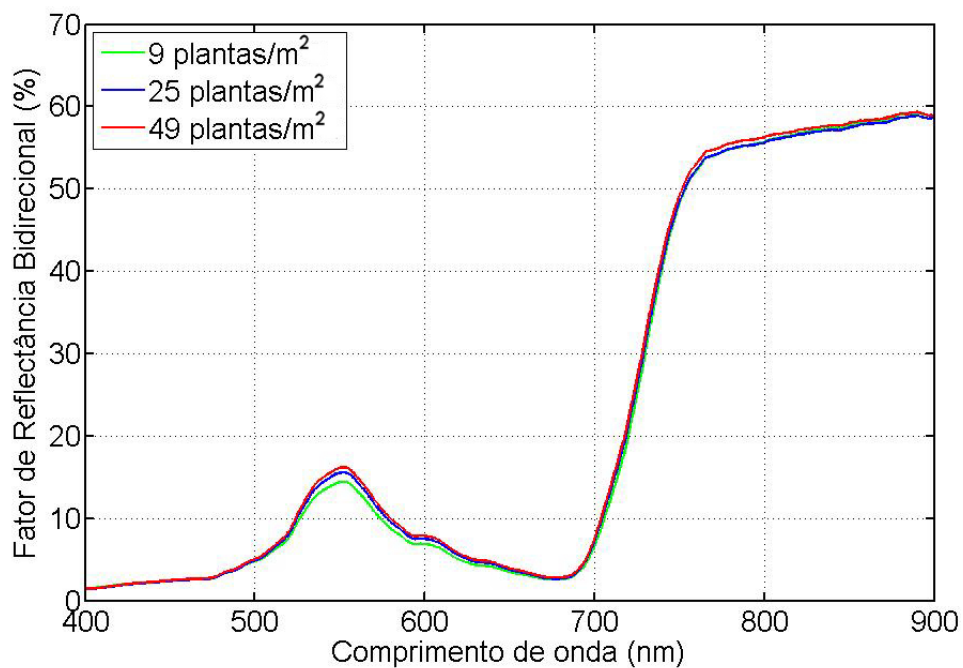


Figura 9 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes densidades de plantio na data de avaliação 17/11/2006.

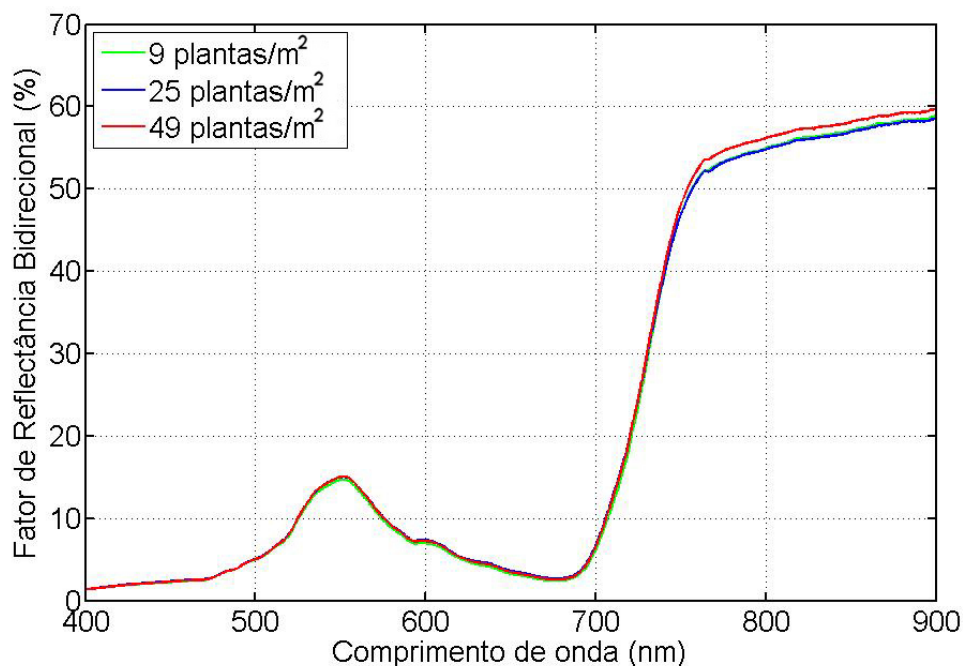


Figura 10 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes densidades de plantio na data de avaliação 19/12/2006.

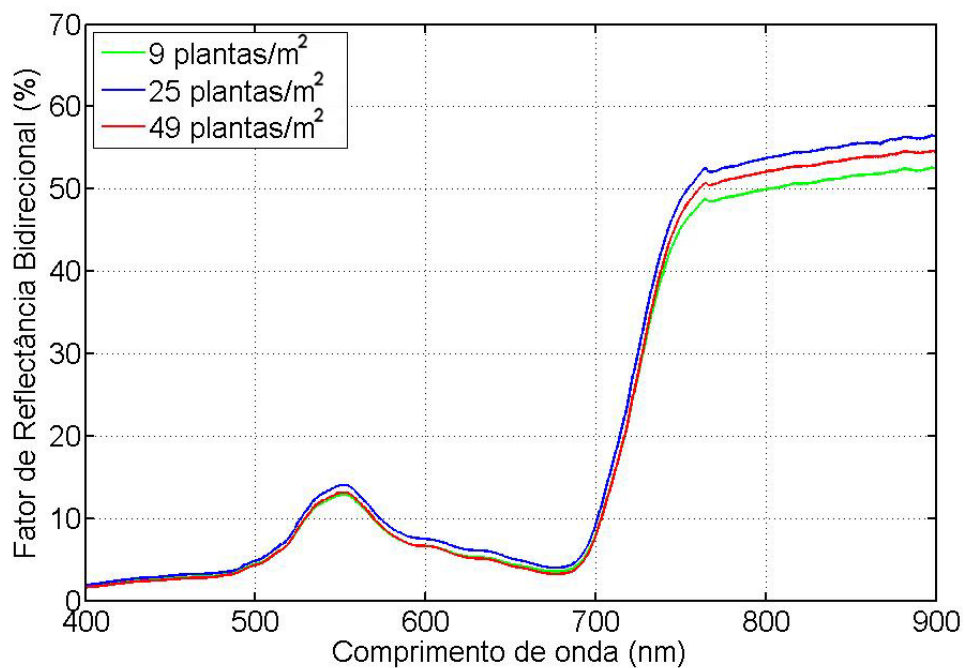


Figura 11 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes densidades de plantio na data de avaliação 08/01/2007.

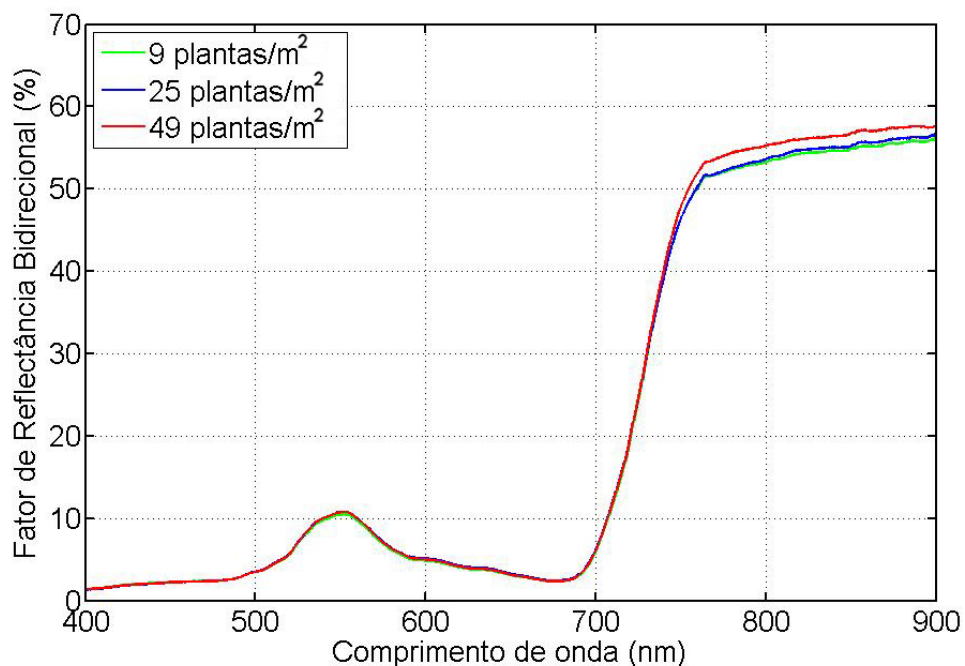


Figura 12 – Fator de reflectância bidirecional do capim-tanzânia em função do comprimento de onda nas diferentes densidades de plantio na data de avaliação 19/01/2007.

4.2. Estudo do teor de nitrogênio foliar em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio

O teste F para a falta de ajustamento, indicou que o modelo de regressão linear de primeiro grau, com exceção do dia 17/11/2006, ajustou-se bem para explicar a variação dos teores de N foliar observados em função das doses de N aplicadas, em todas as datas de avaliações (Tabela 3). Portanto o modelo de primeiro grau foi utilizado para avaliar a significância dos efeitos da dose de N e da densidade de plantio no teor de N foliar.

A não significância para a regressão para a data 17/11/2006, a qual precedeu a aplicação da primeira parcela de nitrogênio era esperada, pois nesta data a dose de N aplicada foi zero em todas as unidades experimentais. Este resultado indica que não havia efeito residual em decorrência das aplicações anteriores de N na área utilizada anteriormente para outro experimento. A não significância para a densidade indica que apesar das unidades experimentais terem sido submetidas a diferentes densidades de plantio, estas diferenças não tiveram efeito significativo no teor de N observado nas folhas. Isto pode ser devido à época de estabelecimento do capim-tanzânia, realizada em dezembro de 2005, ou seja, a forrageira já tinha sofrido a ação de vários cortes que acabou promovendo a indução das gemas basais, originando novos perfilhos.

O teste estatístico “t” constatou a não influência significativa da densidade de plantio ($p < 0,05$) em todas as quatro datas. Isto pode estar relacionado à época de estabelecimento do capim-tanzânia, realizada há aproximadamente um ano, ou seja, a forrageira já tinha sido submetido a vários cortes que acabou promovendo a indução das gemas basais, originando novos perfilhos, restringindo assim as possíveis influências da densidade de plantio.

Para a data de avaliação 08/01/2007, constatou-se também a não influência significativa da dose de N ($p < 0,05$). Isso indica que aos 13 dias após a primeira parcela da adubação com nitrogênio o teor de N foliar não foi influenciado pelas variações das doses de N. Observações semelhantes

foram encontradas por Silva Júnior (2006) aos 15 dias após a adubação com nitrogênio em capim-braquiária.

Tabela 3 – Resultados da análise de regressão do teor de N foliar do capim-tanzânia em função de doses de N e densidades de plantio, para cada data de avaliação dos dados

Data de avaliação	Teste F		Fatores	t
	Falta de Ajuste	Regressão		
17/11/06	0,42 ^{ns}	1,94 ^{ns}	---	---
19/12/06	0,81 ^{ns}	2,25*	Doses de N	2,32*
			Densidades de plantio	-0,69 ^{ns}
			Doses x Densidades	-0,22 ^{ns}
08/01/07	0,80 ^{ns}	2,31*	Doses de N	1,04 ^{ns}
			Densidades de plantio	-1,41 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,93 ^{ns}
19/01/07	2,36 ^{ns}	3,56**	Doses de N	3,55**
			Densidades de plantio	-0,10 ^{ns}
			Doses x Densidades	-1,45 ^{ns}

t: teste “t” estatístico para estimativas dos coeficientes de regressão do modelo; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Após constatar pela análise de regressão (Tabela 3) a não significância da densidade de plantio, procedeu-se a eliminação deste fator do modelo, e efetuou-se a análise de regressão entre o teor de N foliar e as doses de nitrogênio, para as datas 19/12/2006 e 19/01/2007 (Tabela 4).

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) para cada data de avaliação dos dados foram altos, indicando que os modelos propostos são adequados para descrever o fenômeno. Na avaliação 19/01/2007, nota-se que 99% da variação do teor de N foliar pode ser atribuída à variação da dose de N aplicada.

Tabela 4 – Teor de N foliar na parte aérea do capim-tanzânia (\hat{Y}) em função das doses de N aplicadas, em duas datas de avaliação

Data de avaliação	Modelos ajustados	t (N)	t (N ²)	R ²
19/12/06	$\hat{Y} = 1,494 + 2,929E-03N$	4,16**	-	0,95
19/01/07	$\hat{Y} = 1,654 + 7,329E-03N - 1,502E-05N^2$	3,92**	-2,77*	0,99

R²: coeficiente de determinação; t: teste “t” estatístico; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Com base no modelo ajustado, na data 19/12/2006 (Tabela 4), 20 dias após a adubação, o comportamento da variável teor estimado de N foliar na parte aérea do capim-tanzânia (\hat{Y}) aumentou linearmente com as

doses de N utilizadas, variando entre 1,494 e 2,431%, respectivamente, para a dose zero e a maior dose de nitrogênio aplicada.

Silva Júnior (2006) também encontrou resposta linear positiva, aos 21 dias após a adubação, para o teor estimado de N foliar até a maior dose de N aplicada em capim-braquiária. O teor estimado de N variou de 1,619 a 2,839% nos limites das doses de N estudadas (0 a 200 kg ha⁻¹).

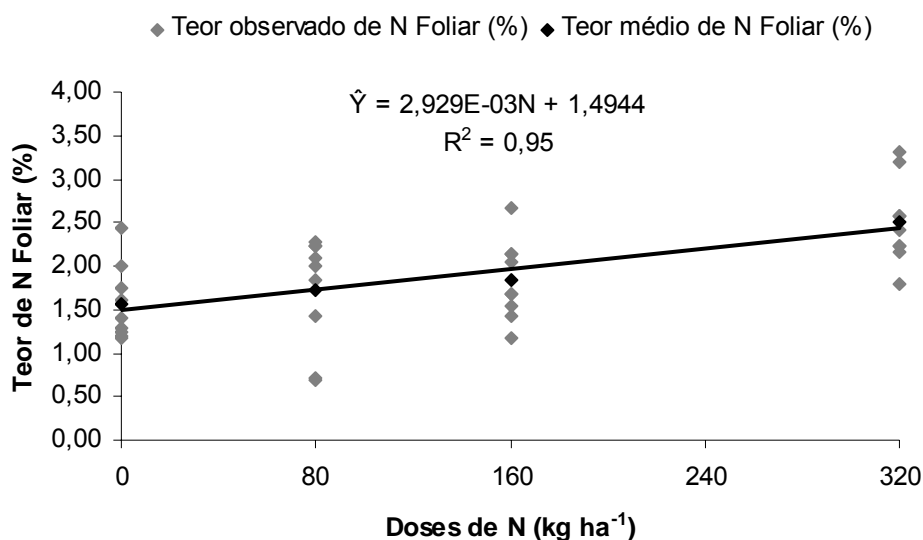


Figura 13 – Modelo ajustado dos valores do teor de N foliar com as doses de nitrogênio utilizadas, no 1º corte do capim-tanzânia, em 19/12/2006.

Na data 19/01/2007, o comportamento da variável teor de N foliar seguiu modelo quadrático de regressão (Tabela 4). O teor estimado de N foliar na parte aérea do capim-tanzânia aumentou até a dose de 243,97 kg ha⁻¹, atingindo valores próximos de 2,548% (ponto de máximo estimado).

A redução na eficiência de utilização do nitrogênio com o aumento das doses aplicadas também foi observada pelos autores Lugão et al. (2003) em pastagem de *Panicum maximum* Jacq. (acesso BRA-006998) e Fagundes et al. (2005) em pastagens de *Brachiaria decumbes* Stapf. (Basilisk). Essa redução, segundo Dougherty e Rhykerd (1985), pode ser explicada por possível desequilíbrio nutricional da planta com altas doses desse nutriente.

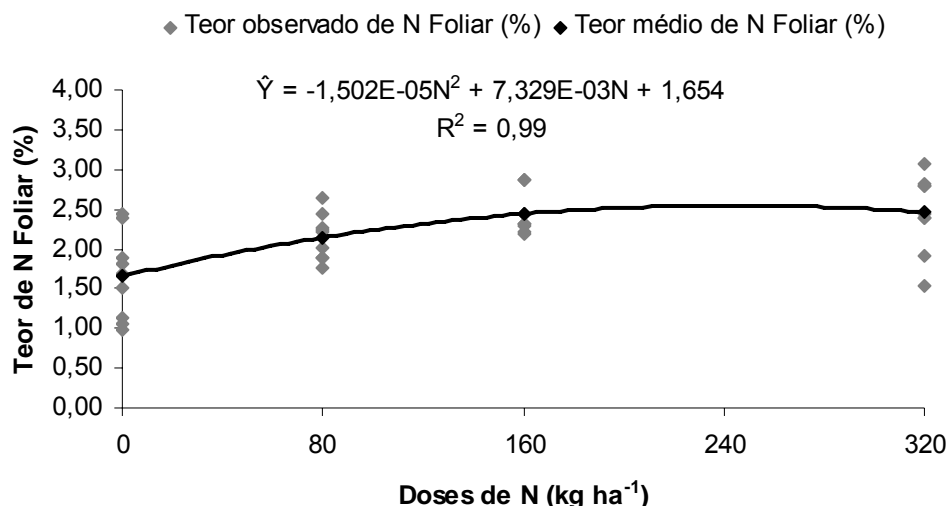


Figura 14 – Modelo ajustado dos valores do teor de N foliar com as doses de nitrogênio utilizadas, no 2º corte do capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

4.3. Estudo dos índices de vegetação em função das doses de nitrogênio e das densidades de plantio

Para os índices de vegetação observados na data 17/11/2006, o teste F para a falta de ajustamento, indicou que o modelo de regressão linear de primeiro grau ajustou-se bem para explicar a variação dos índices de vegetação observados em função das doses de N aplicadas. Entretanto, o teste F para a regressão do modelo não foi significativo (Tabela 5). A não significância para a regressão para esta data, a qual precedeu a aplicação da primeira parcela de nitrogênio era esperada, pois nesta data a dose de N aplicada foi zero em todas as unidades experimentais. Este resultado indica que não havia entre as unidades experimentais diferença entre os valores dos índices de vegetação devido a aplicações anteriores de N na área utilizada para a realização do experimento. Também indica que apesar das unidades experimentais terem sido submetidas a diferentes densidades de plantio, estas diferenças não tiveram efeito significativo no valor do índice de vegetação observado. Isto pode ser devido à época de estabelecimento do capim-tanzânia, realizada há aproximadamente um ano, ou seja, a forrageira já tinha sofrido a ação de vários cortes que acabou promovendo a indução das gemas basais, originando novos perfilhos.

Tabela 5 - Resultados da análise de regressão de índices de vegetação em função de doses de N e densidades de plantio, na data de avaliação 17/11/2006

Índices de vegetação (IV)	Teste F	
	Falta de Ajuste	Regressão
NDVI	0,45 ^{ns}	1,31 ^{ns}
VARI _{RedEdge}	0,44 ^{ns}	1,38 ^{ns}
VARI _{Green}	0,95 ^{ns}	1,35 ^{ns}
WDRVI _(0,05)	0,32 ^{ns}	1,16 ^{ns}
WDRVI _(0,1)	0,16 ^{ns}	0,89 ^{ns}
WDRVI _(0,2)	0,40 ^{ns}	1,25 ^{ns}

^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade; NDVI: IV diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: IV de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Para a data 19/12/2006, verificou-se a não significância para a densidade de plantio ($p < 0,05$). Este fato vem comprovar que o fator densidade de plantio poderia não estar mais caracterizado nas unidades experimentais, tendo em vista o estabelecimento das plantas há aproximadamente um ano e, portanto todas as unidades estariam sob uma condição de mesma densidade de plantio (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultados da análise de regressão dos índices de vegetação em função de doses de N e densidades de plantio, na data de avaliação 19/12/2006

Variáveis	Teste F		Fatores	t
	Falta de Ajuste	Regressão		
NDVI	1,43 ^{ns}	3,19 ^{**}	Doses de N	3,84 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,28 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,40 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,15 ^{ns}
VARI _{RedEdge}	0,57 ^{ns}	5,09 ^{**}	Doses de N	4,65 ^{**}
			(Doses de N) ²	-4,29 ^{**}
			Densidades de plantio	-1,39 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,69 ^{ns}
VARI _{Green}	1,07 ^{ns}	2,48 [*]	Doses de N	2,54 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,27 ^{**}
			Densidades de plantio	-1,22 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,65 ^{ns}
WDRVI _(0,05)	2,67 ^{ns}	3,67 ^{**}	Doses de N	4,28 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,58 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,47 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,08 ^{ns}
WDRVI _(0,1)	1,30 ^{ns}	3,56 ^{**}	Doses de N	4,18 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,52 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,46 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,12 ^{ns}
WDRVI _(0,2)	1,36 ^{ns}	3,42 ^{**}	Doses de N	4,05 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,44 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,45 ^{ns}
			Doses x Densidades	0,14 ^{ns}

t: teste “t” estatístico para estimativas dos coeficientes; * : significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** : significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade. NDVI: Índice de vegetação diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Para a data de avaliação 08/01/2007, somente para o índice VARI_{Green} o teste F para a regressão do modelo ajustado não foi significativo, indicando assim que os fatores doses de N e densidade de plantio não tiveram efeito significativo sobre o índice (Tabela 7). Porém, ao se avaliar por meio do teste estatístico “t” as estimativas dos coeficientes obtidos no modelo para os outros índices, verificou-se para o índice VARI_{RedEdge} a não significância da densidade de plantio ($p < 0,05$). Para os índices NDVI, WDRVI_(0,05), WDRVI_(0,1) e WDRVI_(0,2), verificou-se a não significância dos fatores doses de N e densidade de plantio ($p < 0,05$). Isto pode estar

relacionado à época de estabelecimento do capim-tanzânia, realizada em dezembro de 2005, restringindo assim a possibilidade de influências significativas do fator densidade de plantio. Quanto, a não significância do fator doses de N, os resultados indicam que o dossel não apresenta resposta espectral significativa à adubação 13 dias após a primeira parcela da adubação com nitrogênio.

Tabela 7 - Resultados da análise de regressão dos índices de vegetação em função de doses de N e densidades de plantio, na data de avaliação 08/01/2007

Variáveis	Teste F		Fatores	t
	Falta de Ajuste	Regressão		
NDVI	1,81 ^{ns}	2,40 [*]	Doses de N	0,28 ^{ns}
			Densidades de plantio	-0,12 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,33 ^{ns}
VARI _{RedEdge}	1,25 ^{ns}	3,64 ^{**}	Doses de N	3,16 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,78 ^{**}
			Densidades de plantio	-1,09 ^{ns}
			Doses x Densidades	2,35 ^{ns}
VARI _{Green}	2,31 ^{ns}	1,93 ^{ns}	---	---
WDRVI _(0,05)	1,82 ^{ns}	2,61 [*]	Doses de N	-0,04 ^{ns}
			Densidades de plantio	-
			Doses x Densidades	0,005 ^{ns}
WDRVI _(0,1)	1,84 ^{ns}	2,56 [*]	Doses de N	1,67 ^{ns}
			Densidades de plantio	0,06 ^{ns}
			Doses x Densidades	-0,03 ^{ns}
WDRVI _(0,2)	1,84 ^{ns}	2,51 [*]	Doses de N	1,57 ^{ns}
			Densidades de plantio	0,15 ^{ns}
			Doses x Densidades	-0,07 ^{ns}
				1,48 ^{ns}

t: teste "t" estatístico para estimativas dos coeficientes; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade. NDVI: Índice de vegetação diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Para a data de avaliação 19/01/2007, somente para o índice VARI_{Green} o teste F para a regressão do modelo ajustado não foi significativo, indicando assim que os fatores doses de N e densidade de plantio não tiveram efeito significativo sobre o índice (Tabela 8). Verificou-se também para os outros índices, a não significância para a densidade de plantio ($p < 0,05$). Este fato vem comprovar que o fator densidade de plantio poderia não

estar mais caracterizado nas unidades experimentais, tendo em vista o estabelecimento das plantas há aproximadamente um ano e, portanto todas as unidades estariam sob uma condição de mesma densidade de plantio.

Tabela 8 - Resultados da análise de regressão dos índices de vegetação em função de doses de N e densidades de plantio, na data de avaliação 19/01/2007

Variáveis	Teste F		Fatores	t
	Falta de Ajuste	Regressão		
NDVI	1,44 ^{ns}	3,16 ^{**}	Doses de N	3,62 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,61 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,79 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,19 ^{ns}
VARI _{RedEdge}	1,75 ^{ns}	5,96 ^{**}	Doses de N	4,87 ^{**}
			(Doses de N) ²	-4,66 ^{**}
			Densidades de plantio	-1,49 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,76 ^{ns}
VARI _{Green}	0,91 ^{ns}	1,30 ^{ns}	---	---
WDRVI _(0,05)	1,17 ^{ns}	3,61 ^{**}	Doses de N	4,01 ^{**}
			(Doses de N) ²	3,99 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,67 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,32 ^{ns}
WDRVI _(0,1)	1,22 ^{ns}	3,48 ^{**}	Doses de N	3,90 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,89 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,72 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,29 ^{ns}
WDRVI _(0,2)	1,26 ^{ns}	3,35 ^{**}	Doses de N	3,79 ^{**}
			(Doses de N) ²	-3,78 ^{**}
			Densidades de plantio	-0,75 ^{ns}
			Doses x Densidades	1,25 ^{ns}

t: teste “t” estatístico para estimativas dos coeficientes; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade. NDVI: Índice de vegetação diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Tendo em vista a não significância do fator densidade de plantio, realizou-se uma nova análise de regressão entre os índices de vegetação e as doses de nitrogênio (Tabela 9). Observam-se altos valores para o coeficiente de determinação (R^2), para todos os índices de vegetação, demonstrando que os modelos propostos são adequados para descrever o fenômeno. Constatam-se ainda na data de avaliação 19/12/2006, que 99%

da variação dos valores dos índices $VARI_{RedEdge}$ e $VARI_{Green}$ do capim-tanzânia, é explicada pela variação das doses aplicadas de nitrogênio.

Tabela 9 – Resultados da análise de regressão dos índices de vegetação em função de doses de N

Data de avaliação	Modelos ajustados	t (N)	t (N ²)	R ²
19/12/2006	NDVI	4,31**	-3,28**	0,96
	$VARI_{RedEdge}$	5,45**	-4,29**	0,99
	$VARI_{Green}$	3,11**	-3,27**	0,99
	$WDRVI_{(0,05)}$	4,77**	-3,58**	0,97
	$WDRVI_{(0,1)}$	4,67**	-3,52**	0,97
	$WDRVI_{(0,2)}$	4,54**	-3,44**	0,96
08/01/2007	$VARI_{RedEdge}$	4,67**	-3,78**	0,98
19/01/2007	NDVI	4,56**	-3,62**	0,96
	$VARI_{RedEdge}$	6,19**	-4,66**	0,96
	$WDRVI_{(0,05)}$	5,05**	-3,99**	0,98
	$WDRVI_{(0,1)}$	4,91**	-3,89**	0,97
	$WDRVI_{(0,2)}$	4,76**	-3,78**	0,97

R²: coeficiente de determinação; t: teste “t” estatístico; *: significativo ao nível de 5% de probabilidade; **: significativo ao nível de 1% de probabilidade. NDVI: Índice de vegetação diferença normalizada; $VARI_{RedEdge}$: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; $VARI_{Green}$: Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; $WDRVI$: Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Analogamente ao que foi observado para o teor de N foliar, os índices de vegetação no geral apresentaram uma ligeira tendência de decréscimo com aplicação de dosagens situadas acima de 230 kg ha⁻¹ (Figuras 15 a 26), que pode estar relacionado a uma possível desequilíbrio nutricional da planta com altas doses de N (DOUGHERTY & RHYKERD, 1985).

Resultados semelhantes foram encontrados por Cunha (2004), o autor observou que dosagens situadas acima de 1500 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, apresentam uma tendência de decréscimo dos valores do NDVI do capim-tanzânia, em virtude de uma possível influência negativa dos fatores relacionados ao excesso de N.

Observou-se ainda nas Figuras 15 a 26, uma alta variabilidade nos valores dos índices de vegetação para a dose zero. Deste modo, realizou-se uma análise do coeficiente de variação para estudar a variabilidade nos valores de reflectância média para as bandas azul (460 a 480 nm), verde (545 a 565 nm), vermelho (620 a 670 nm), transição do vermelho ao infravermelho próximo (700 a 710 nm) e infravermelho próximo (840 a 880

nm), utilizadas para calcular os índices de vegetação (Tabela 10). Observou-se na Tabela 10 que as bandas do vermelho e do verde apresentaram maior valor de coeficiente de variação para as três datas estudadas. Este fato pode estar relacionado à deficiência de nitrogênio, pois as plantas com essa deficiência apresentam diminuição do teor de clorofila (VIÑA et al., 2004; KNIPLING, 1970) e, conseqüentemente, outros pigmentos (antocianinas, carotenóides e xantofilas) estariam influenciando na resposta espectral na banda do verde e do vermelho, e também apresentam redução da área foliar exposta ao sensor, ou seja, ao aumento da exposição do solo na reflectância média da forrageira, que afeta a reflectância na banda do vermelho (KNIPLING, 1970).

Tabela 10 – Coeficiente de variação (%) calculado para cada banda espectral, em três datas de avaliação e para a dose 0 kg de N ha⁻¹

Bandas espectrais	Datas de avaliações		
	19/12/2007	08/01/2007	19/01/2007
460 a 480 nm	9,61%	22,39%	8,94%
545 a 565 nm	15,01%	-	15,33%
620 a 670 nm	25,33%	31,08%	23,75%
700 a 710 nm	9,61%	22,39%	8,94%
840 a 880 nm	5,86%	-	5,47%

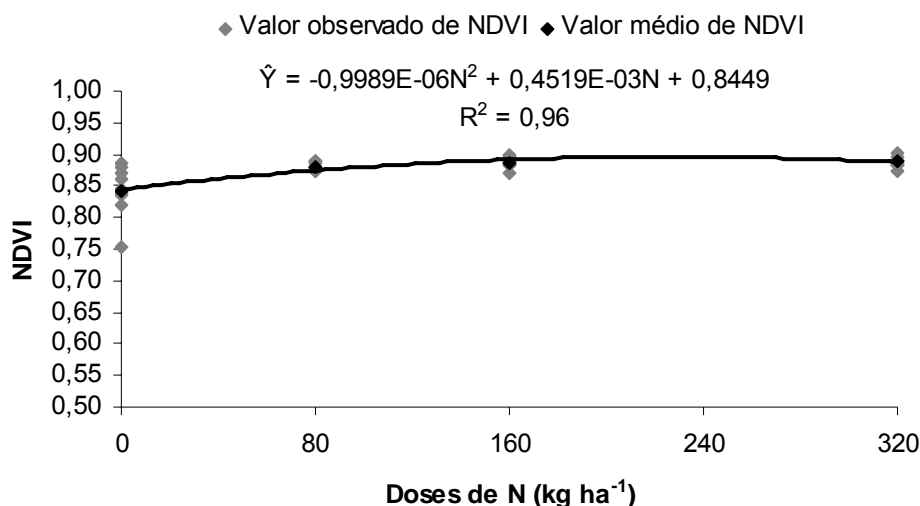


Figura 15 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

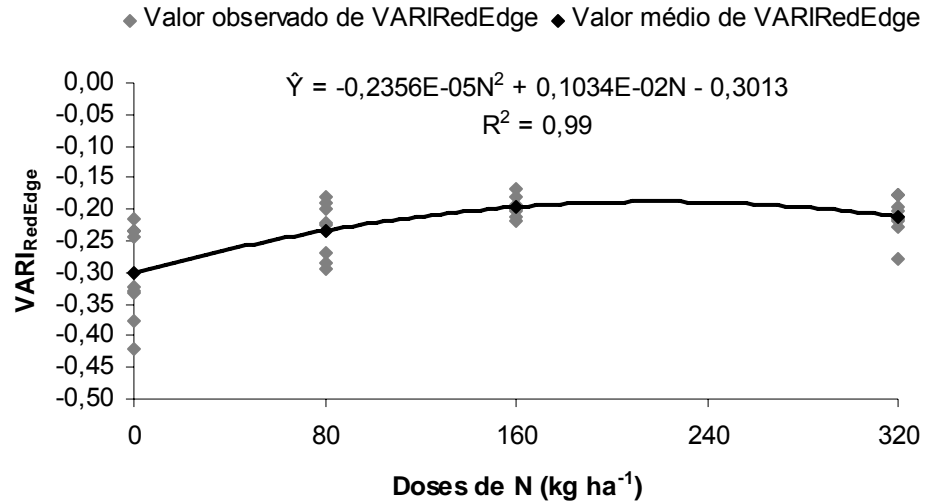


Figura 16 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo (VARIRedEdge) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

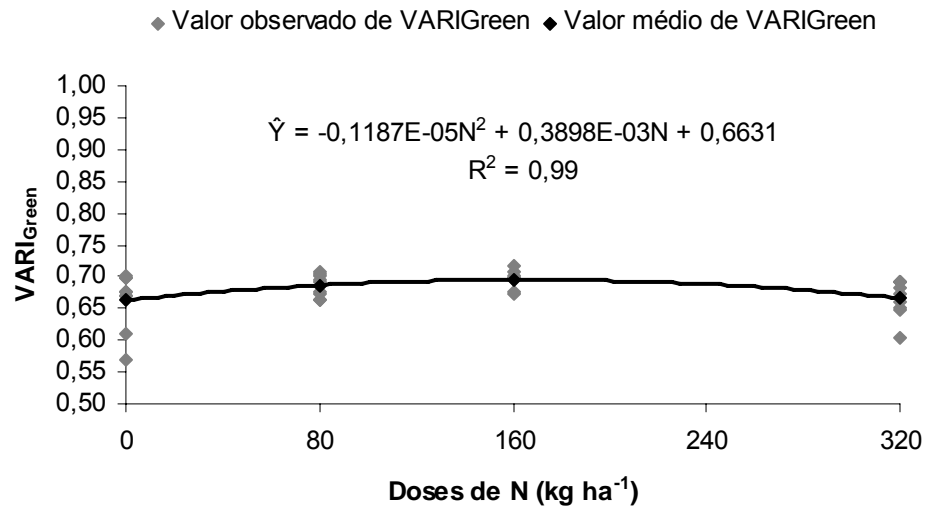


Figura 17 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde (VARIGreen) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

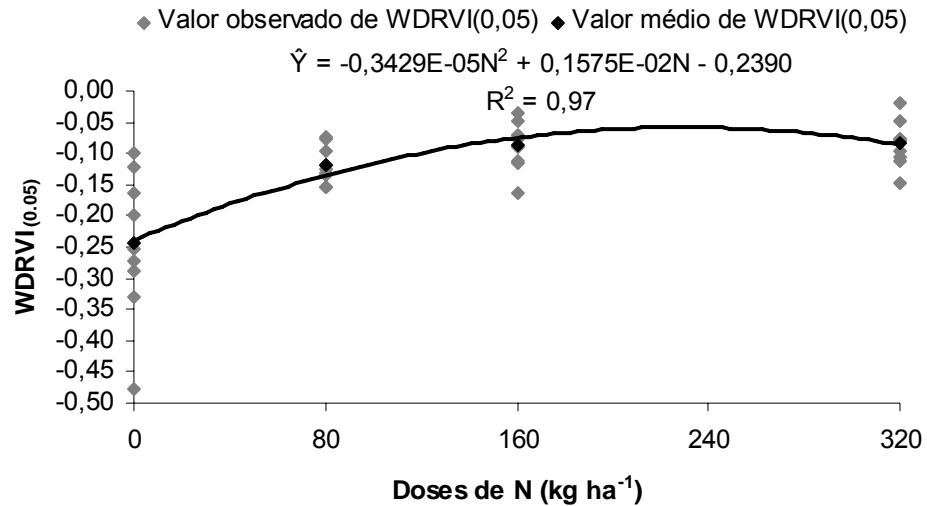


Figura 18 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,05 ($WDRVI_{(0,05)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

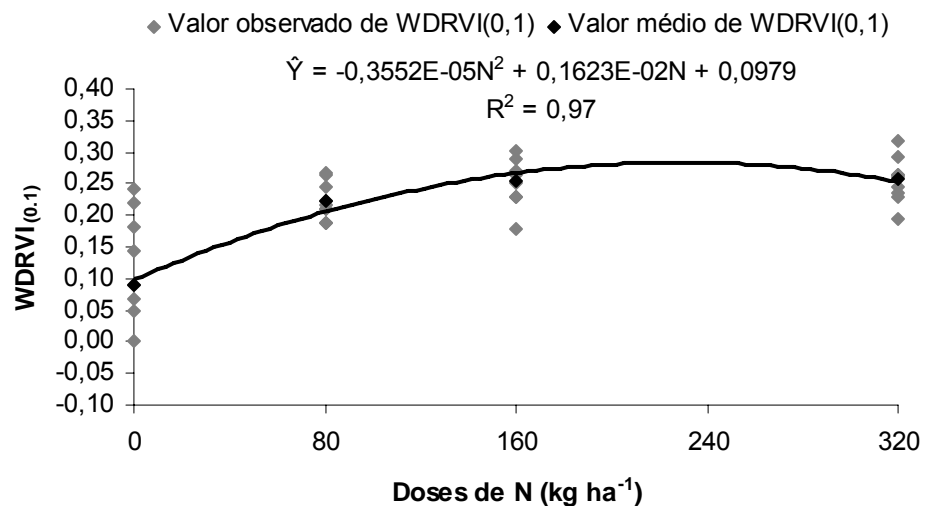


Figura 19 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,1 ($WDRVI_{(0,1)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

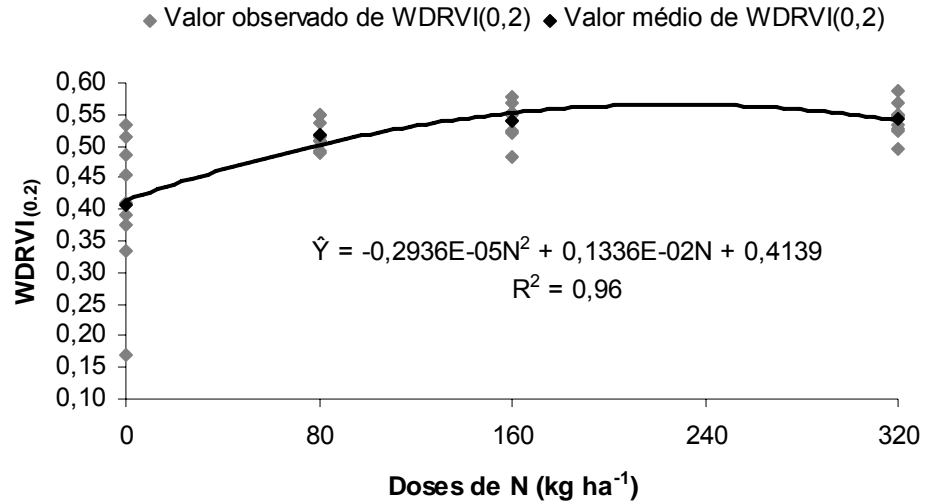


Figura 20 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,2 ($WDRVI_{(0,2)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/12/2006.

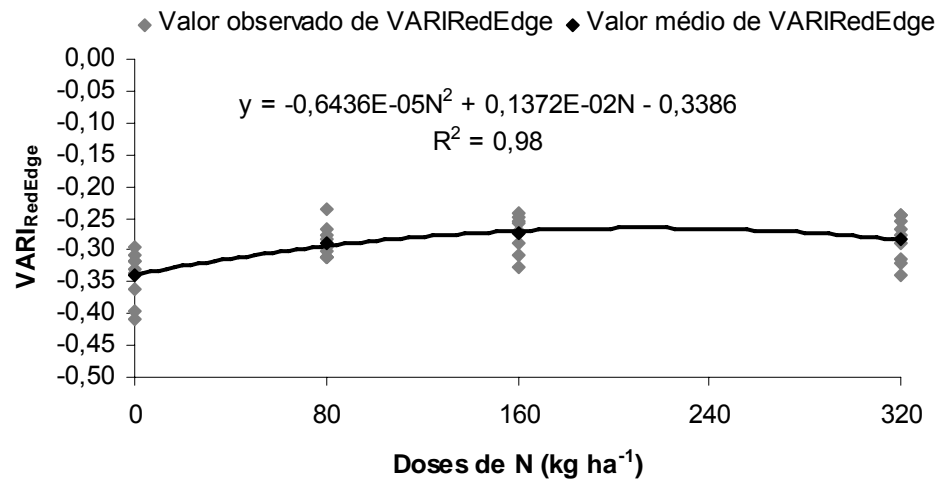


Figura 21 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo ($VARI_{RedEdge}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 08/01/2007.

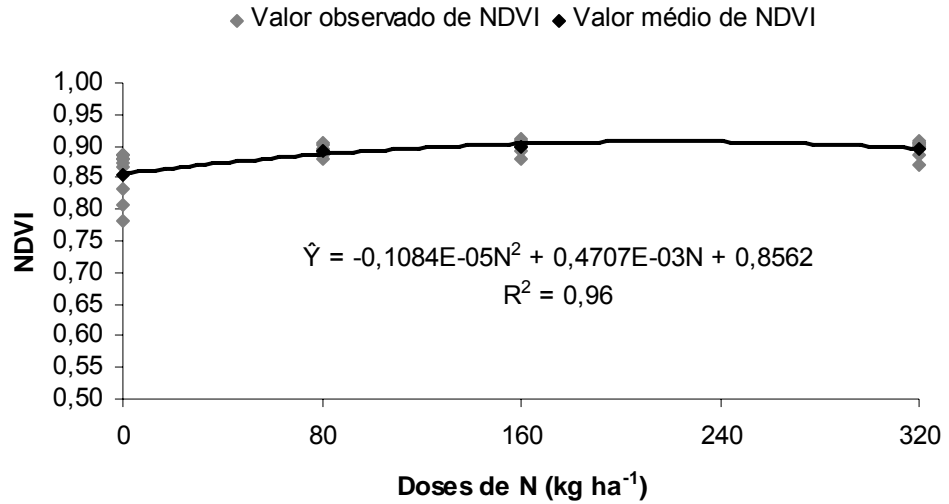


Figura 22 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

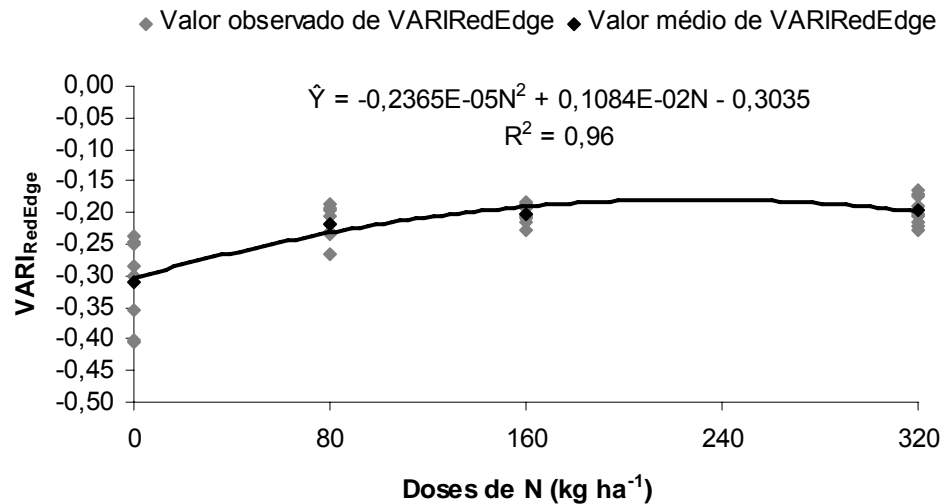


Figura 23 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo ($VARI_{RedEdge}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

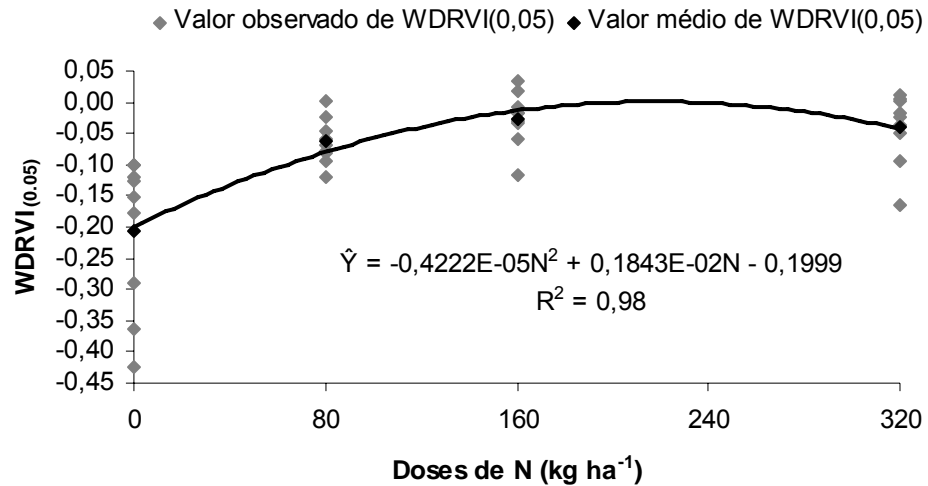


Figura 24 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,05 ($WDRVI_{(0,05)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

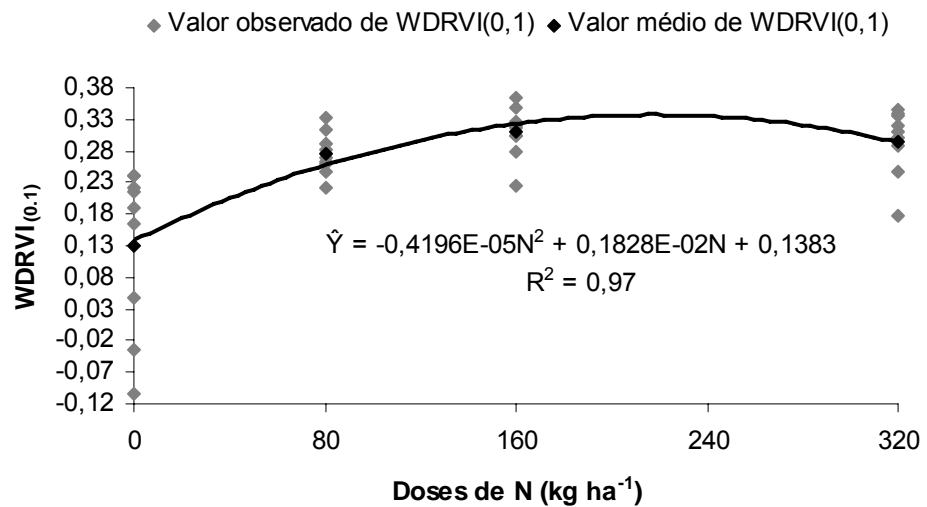


Figura 25 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,1 ($WDRVI_{(0,1)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

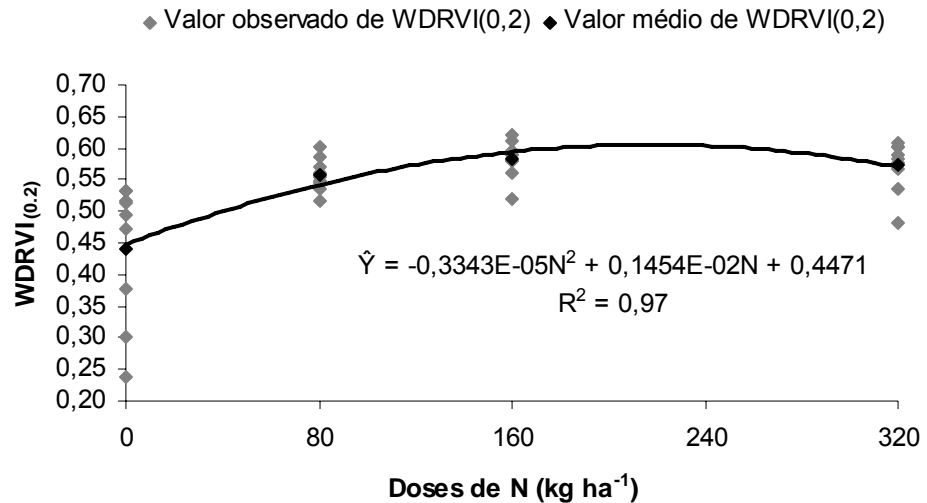


Figura 26 – Modelo ajustado dos valores do Índice de vegetação de amplo alcance dinâmico calculado utilizando coeficiente de ponderação 0,2 ($WDRVI_{(0,2)}$) com as doses de nitrogênio utilizadas no capim-tanzânia, na data 19/01/2007.

Observando a Tabela 11, para a data 19/12/2006, constatou-se que o $WDRVI_{(0,05)}$ foi o melhor índice de vegetação para discriminar doses de nitrogênio, pois apresentou maior fator de multiplicação (7,3994), e apresentou também maior sensibilidade ao intervalo das doses de nitrogênio utilizadas, de 0 a 229,6 $kg\ ha^{-1}$.

Para a data 19/01/2007, o $WDRVI_{(0,05)}$ também apresentou maior fator de multiplicação (2,8639), entretanto o índice $VARI_{RedEdge}$ foi o que apresentou maior sensibilidade ao intervalo das doses de nitrogênio utilizadas, de 0 a 229,1 $kg\ ha^{-1}$. Deste modo, o índice $VARI_{RedEdge}$ e $WDRVI_{(0,05)}$ foram os melhores para discriminar doses de nitrogênio para esta data.

Os resultados indicaram que não houve tendência de um mesmo índice sobressair em relação aos outros para discriminar as doses de nitrogênio aplicadas para as datas estudadas.

Tabela 11 – Valores máximos e mínimos dos modelos ajustados dos índices de vegetação, para três datas de avaliação

Data de avaliação	Índices de Vegetação (IV)	Valor máximo (dose)	Valor mínimo (dose)	Fator de multiplicação
19/12/2006	NDVI	0,8960 (226,2)	0,8449 (0)	1,0605
	VARI _{RedEdge}	-0,1878 (219,4)	-0,3013 (0)	1,7967
	VARI _{Green}	0,6951 (164,20)	0,6631 (0)	1,0482
	WDRVI _(0,05)	-0,0581 (229,6)	-0,2390 (0)	7,3994
	WDRVI _(0,1)	0,2832 (228,4)	0,0980 (0)	3,2398
	WDRVI _(0,2)	0,5658 (227,5)	0,4139 (0)	1,3593
08/01/2007	VARI _{RedEdge}	-0,2655 (106,6)	-0,3386 (0)	1,2102
19/01/2007	NDVI	0,9072 (217,1)	0,8562 (0)	1,0648
	VARI _{RedEdge}	-0,1792 (229,1)	-0,3035 (0)	1,9391
	WDRVI _(0,05)	0,0012 (218,2)	-0,1999 (0)	2,8639
	WDRVI _(0,1)	0,3373 (217,8)	0,1383 (0)	2,5098
	WDRVI _(0,2)	0,6052 (217,4)	0,4471 (0)	1,7880

NDVI: IV diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: IV de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2); Fator de multiplicação = Valor máximo / Valor mínimo.

4.4. Análise da correlação entre os índices de vegetação e valores SPAD

Para se conhecer a relação entre os índices de vegetação que tiveram seus modelos ajustados e os valores SPAD do capim-tanzânia, foi realizada uma análise de correlação simples (Tabela 12). De maneira geral, notou-se que predominaram valores de coeficientes altos e positivos, exceto para o índice VARI_{Green}, que teve correlação não significativa. Para as datas de avaliação 19/12/2007 e 19/01/2006, os maiores valores dos coeficientes ocorreram para o VARI_{RedEdge}, 0,82 e 0,92, respectivamente. O melhor coeficiente de correlação para o índice VARI_{RedEdge}, pode ser atribuído a região que esse índice utiliza, ou seja, a região do visível do espectro. Nesta região, segundo Ponzoni (2001), as características dos pigmentos existentes na folha dominam a resposta espectral, principalmente as clorofilas “a” e “b”.

De acordo com Yoder e Pettigrew-Crosby (1995), existe uma forte relação (linear e positiva) entre nitrogênio e clorofila, pois o nitrogênio é um dos nutrientes que participa diretamente na formação da molécula da clorofila.

Viña et al. (2004), ao avaliar remotamente o desenvolvimento fenológico do milho, testaram os índices $VARI_{RedEdge}$ e $VARI_{Green}$, e concluíram que os mesmos têm alta sensibilidade ao teor de clorofila presente nas folhas. Segundo os mesmos autores, estes índices podem indicar mais precocemente a fase de estresse da cultura, pois um dos sintomas do estresse é a redução do teor de clorofila.

Tabela 12 – Coeficientes de correlação simples entre os índices de vegetação e a variável agrônômica SPAD, nas três datas de avaliação

Índices de Vegetação (IV)	Datas		
	19/12/2006	08/01/2007	19/01/2007
NDVI	0,76**	---	0,82**
$VARI_{RedEdge}$	0,82**	0,68**	0,92**
$VARI_{Green}$	0,32 ^{ns}	---	---
$WDRVI_{(0,05)}$	0,77**	---	0,82**
$WDRVI_{(0,1)}$	0,77**	---	0,82**
$WDRVI_{(0,2)}$	0,77**	---	0,82**

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade. ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade. NDVI: IV diferença normalizada; $VARI_{RedEdge}$: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; $VARI_{Green}$: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: IV de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

4.5. Análise da correlação entre os índices de vegetação e a massa seca (MS)

Foi realizada uma análise de correlação simples, com o objetivo de se conhecer a relação entre os índices de vegetação que tiveram seus modelos ajustados e a variável massa seca (MS) do capim-tanzânia (Tabela 13).

Constatou-se que os maiores valores dos coeficientes (R^2) ocorreram para os índices $VARI_{RedEdge}$ e $WDRVI_{(0,05)}$ (Tabela 13). Gitelson et al. (2003) testaram na cultura do milho o $VARI_{RedEdge}$ e o $VARI_{Green}$, e concluíram que os mesmos são mais precisos que o NDVI para estimar o índice de área foliar e a massa seca.

Tabela 13 – Coeficientes de correlação simples entre os seis índices de vegetação e a variável agrônômica massa seca (MS) na data 20/01/2007

Índices de vegetação (IV)	MS
NDVI	0,66**
VARI _{RedEdge}	0,69**
WDRVI _(0,05)	0,69**
WDRVI _(0,1)	0,68**
WDRVI _(0,2)	0,67**

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade. NDVI: IV diferença normalizada; VARI_{RedEdge}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda de transição do vermelho ao infravermelho próximo; VARI_{Green}: IV resistente à atmosfera na região do visível utilizando a banda do verde; WDRVI: IV de amplo alcance dinâmico, calculado utilizando três valores de coeficientes de ponderação (0,05, 0,1 e 0,2).

Assim, analisando os seis índices de vegetação testados para as datas de avaliação, constatou-se que pela análise de correlação simples o índice que tendeu a apresentar o maior valor para a correlação com todas as características culturais estudadas (valores de SPAD e MS) foi o VARI_{RedEdge} (Tabelas 12 e 13).

Realizou-se também um estudo da produção de massa seca em função das doses de nitrogênio. Analisando a Figura 27, constata-se que o comportamento da variável produção estimada de massa seca seguiu modelo quadrático de regressão. Semelhante ao que foi observado para o teor de N foliar e para os índices de vegetação, a produção estimada de massa seca aumentou até a dose de 212,69 kg ha⁻¹, atingindo valores de 3742,98 kg ha⁻¹.

A redução na produção de massa seca com o aumento das doses de também foi observada pelos autores Cunha (2004) e Soria (2002), este fato pode estar relacionado a uma possível influência negativa do excesso de N, contribuindo para o aumento da senescência da pastagem (WILSON & MANETJE, 1978) e também na indução de toxidez na planta (VICENTE-CHANDLER et al., 1962).

Observou-se alto valor para o coeficiente de determinação (R²), demonstrando que o modelo proposto é adequado para descrever o fenômeno. Nota-se que 97% da variação dos valores de produção de massa seca do capim-tanzânia pode ser atribuída à variação das doses aplicadas de nitrogênio.

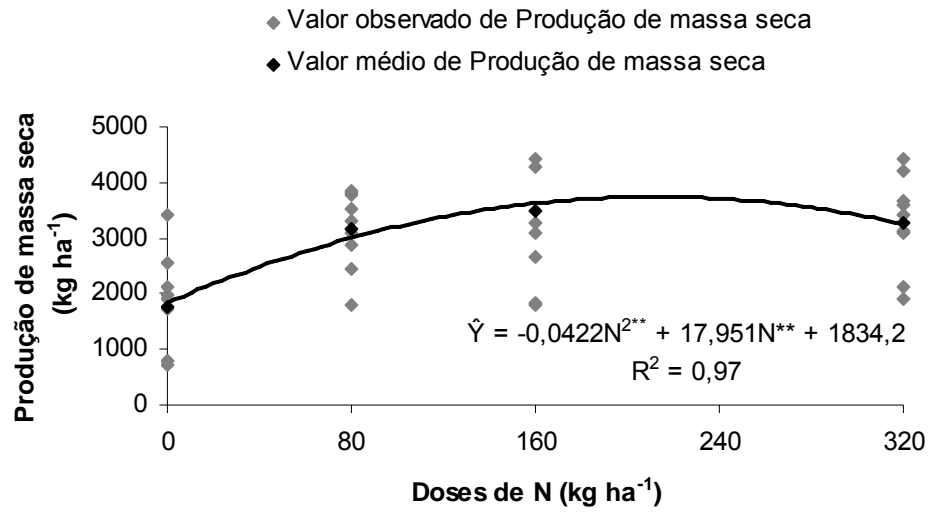


Figura 27 – Modelo ajustado dos valores de produção de massa seca com as doses de nitrogênio utilizadas, no 2º corte do capim-tanzânia, na data 20/01/2007.

5. CONCLUSÕES

- A resposta espectral do dossel do capim-tanzânia ao longo das avaliações, tendem em geral apresentar comportamento espectral característico de vegetação verde.
- Na região do visível do espectro, há tendência geral da reflectância do dossel do capim-tanzânia diminuir com o aumento das doses de nitrogênio. Enquanto na região do infravermelho próximo, a resposta espectral é oposta a da região visível do espectro.
- A densidade de plantio do capim-tanzânia, um ano após o seu estabelecimento, nas duas regiões espectrais (visível e infravermelho próximo), não influencia a reflectância.
- A densidade de plantio do capim-tanzânia não tem efeito sobre as variáveis teor de N foliar, índices de vegetação e massa de forragem seca, que pode estar relacionado à época de estabelecimento do capim-tanzânia, realizada há aproximadamente um ano.
- Para 30 dias após o primeiro corte e 20 dias após a adubação, o $WDRVI_{(0,05)}$ é o melhor índice para discriminar doses de nitrogênio.
- Para 15 dias após o segundo corte e 13 dias após a primeira parcela da adubação, o $VARI_{RedEdge}$ é o melhor índice para discriminar doses de nitrogênio.
- Para 26 dias após o segundo corte e 11 dias após a 2ª parcela da adubação, os índices $VARI_{RedEdge}$ e $WDRVI_{(0,05)}$ são os melhores para discriminar doses de nitrogênio.
- Os resultados indicam que não há tendência de um mesmo índice sobressair para discriminar as doses de N aplicadas em relação aos outros para as datas estudadas.
- Para as todas datas de avaliação, o índice que tem maior correlação com os valores de SPAD e MS é o $VARI_{RedEdge}$.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. E.; FISCHER, R. L.; DELOACH, S. R. Remote sensing and precision agriculture: Ready for harvest or still maturing? **Journal of Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 65, n.10, p. 1118-1123, 1999.

ANTUNES, M. A. H. **Avaliação dos modelos SUITS e SAIL no estudo da reflectância da soja (*Glycine max* (L.) MERRIL)**. 1992. 140 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

ASRAR, G.; KANEMASU, E. T.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 3, p. 211-220, 1985.

ASSAD, E. D.; MADEIRA NETO, J. S.; MOREIRA, L. Uso de padrões radiométricos para separação de quatro espécies de gramíneas em condições de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 10, p. 1625-1633, 1991.

BARCELLOS, A. O.; VILELA, L.; LUPINACCI, A. V. Produção animal a pasto: desafios e oportunidades. In: ENCONTRO NACIONAL DO BOI VERDE: A PECUÁRIA SUSTENTÁVEL, 3., 2001, Uberlândia, **Anais...** Uberlândia: Sindicato Rural de Uberlândia, 2001. p. 29 - 64.

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. **Photogrammetria**, v. 43, n. 5, p. 241-256, 1989.

BAUER, M. E.; VANDERBILT, V. C.; ROBINSON, B. F.; DAUGHTRY, C. S. T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 14., 1980, Hamburg. **Proceedings...** Hamburg, 1980. p. 56 - 73.

BAUSCH, W. C.; DUKE. H. R. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. **Trans. ASAE**, v. 39, p. 1869 - 1875, 1996.

BERNARDES, M. S. Fotossíntese no dossel das plantas cultivadas. In: CASTRO, P. R. **Ecologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo, 1987. 249 p.

BOEGH, E.; SOEGAARDA, H.; BROGEB, N.; HASAGER, C. B.; JENSEN, N. O.; SCHELDEB, K.; THOMSEN, A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. **Remote sensing of environment**, n. 81, p. 179 - 193, 2002.

CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, M. M.; FONSECA, D. M.; ARRUDA, M. L.; VILELA, H.; OLIVEIRA, F. T. T. Pastagens. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. p. 332 - 341.

CORRÊA, A. S. Análise retrospectiva e tendências da pecuária de corte no Brasil, In: REUNIÃO ANUAL DA SBZ, 37., 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2000. p. 181-206.

COSTA, C.; DWYER, L. M.; DUTILLEUL, P.; STEWART, D. W.; MA, B. L.; SMITH, D. L. Inter-relationships of applied nitrogen, spad, and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 8, p.1173 - 1194, 2001.

CUNHA, C. A. H. **Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim-tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio**. 2004. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, 2004.

DEERING, W. D. Field measurements of bidirectional reflectance. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York: John Wiley, 1989. p. 14-65.

DIKER, K.; BAUSCH, W. C. Potencial of use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. **Biosystem Engineering**, v.84, n. 4, p. 437-447, 2003.

DOUGHERTY, C. T.; RHYKERD, C. L. The role of nitrogen in forage-animal production. In: HEATH, M. E. et al. (Ed.). **Forages: the science of grassland agriculture**. Iowa: State University, 1985. 5. ed. p. 318 - 325.

EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 26 set. 2006.

FAGUNDES, J. L.; FONSECA, D. M.; GOMIDE, J. A.; JUNIOR, D. N.; VITOR, C. M. T.; MORAIS, R. V.; MISTURA, C.; REIS, G. C.; MARTUSCELLO, J. A. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 397-403, 2005.

FERNÁNDEZ, S.; VIDAL, D.; SIMÓN, E. et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n. 9, p. 1867-1884, 1994.

FONSECA, E. L.; ROSA, L. M. G.; FONTANA, D. C. Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 3, p. 365-371, 2002.

FORNI, S.; MICHEL FILHO, I. C.; FAVORETTO, V. Efeito de estratégias de adubação com NPK sobre a produção, qualidade e estrutura dos cultivares Tanzânia e Mombaça de *Panicum maximum* Jacq. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37., 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000.

FREITAS, K. R.; ROSA, B.; RUGGIERO, J. A.; NASCIMENTO, J. L.; HEINEMAM, A. B.; FERREIRA, P. H.; MACEDO, R. Avaliação do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.) submetido a diferentes doses de nitrogênio. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 1, p. 83-89, 2005.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289 - 298, 1996.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D.C. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 76 - 87, 2002a.

GITELSON, A. A.; STARK, R.; GRITS, U.; RUNDQUIST, D. C.; KAUFMAN, Y.J.; DERRY, D. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 2537 - 2562, 2002b.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T. J.; RUNDQUIST, D. C.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 5, 2003.

GITELSON, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal Plant Physiology**, v. 161, n. 2, p. 165 - 173, 2004.

GOEL, P. K.; PRASHER, S. O.; PATEL, R. M. ; LANDRY, J. A.; BONNELL, R. B.; VIAU, A. A. Classification of hyperspectral data by decision trees and artificial neural networks to identify weed stress and nitrogen status of corn. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 39, n. 2, p. 67-93, 2003.

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1975. 65 p.

GOPALAPILLAI, S.; TIAN, L.; BEEL, J. Detection of nitrogen stress in corn using digital aerial imagery. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 1998, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1998. Paper n° 98-3030.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J., DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 416 - 426, 2002.

HANSEN, P. M.; SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 542 - 553, 2003.

HERLING, V. R.; PÁDUA, M. B.; PAIVA, F. A. LUCHESI, M. M.; BATEMARQUES, V. G.; LUZ, P. H. C.; LIMA, C. G. Valor nutritivo da matéria seca disponível do capim-Mombaça (*Panicum maximum* Jacq.) sob pastejo. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 37., 2000, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SBZ, 2000.

HILL, J. M.; DONALD, G. M.; HYDER, M. W.; SMITH, R. C. G. Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 528 - 545, 2004

HOLBEN, B. N.; TUCKER, C. J.; FAN, C. J. Spectral assessment of soybean leaf area index and leaf biomass. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, n. 5, p. 651 - 656, 1980.

JENSEN, A.; LORENZEN, B.; SPELLING-OSTERGAARD, H.; KLOSTER-HVELPLUND, E. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen levels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 10, p. 1809 - 1820, 1990.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B.; IVO, B.; KHICHEL, A. G. **Degradação e formas de recuperação e renovação e manejo de pastagens**. Embrapa, 2001. (Apostila do Curso de Pastagem). 6p.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 2, p. 155 - 159, 1970.

LABSPHERE. Reflectance characteristics of Spectralon panels. Reflectance Calibration Laboratory. Labsphere Inc., Sutton, NH, USA, 9 p., 1998.

LAMB, J. A.; ANDERSON, J. L.; MALZER, G. L. Perils of monitoring grain yield on-the-go. In: PROC. SITE-SPECIFIC MAGMT. FOR AGRICULTURAL SYSTEMS, 1994, Madison. **Anais...** Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1995. p. 87 - 90.

LAVRES JUNIOR, J. **Combinações de doses de Nitrogênio e Potássio para o Capim-Mombaça**. 2001. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Piracicaba, 2001.

LEITE BRASIL. Disponível em: <www.leitebrasil.org.br>. Acesso em: 26 set. 2006.

LUGÃO, S. M. B.; RODRIGUES, L. R. A.; ABRAHÃO, J. J. S.; MALHEIROS, E. B.; MORAIS, A. Acúmulo de forragem e eficiência de utilização do Nitrogênio em pastagens de *Panicum maximum* Jacq. (Acesso BRA-006998) adubadas com Nitrogênio. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 371 - 379, 2003.

MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Dourados: EMBRAPA –CPAO, 2000. 4p. (Comunicado técnico, 62).

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely – sensed images: an introduction**. New York: John Wiley, 1994. 352p.

MARCELINO, K. R. A.; VILELA L.; LEITE, G. G.; GUERRA, A. F.; DIOGO, J. M. S. Manejo da adubação nitrogenada de tensões hídricas sobre a produção de matéria seca e índice de área foliar de tifton 85 cultivado no cerrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 2, p. 268 - 275, 2003.

MARTHA JUNIOR, G. B.; CORSI, M. Pastagens no Brasil, situação atual e perspectivas. **Preços Agrícolas**, v. 171, p. 3 – 6, 2001.

MELLO, A. C. L. **Respostas morfofisiológicas do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia) irrigado à intensidade de desfolha sob lotação rotacionada**. 2002. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MENESES, P. R. Fundamentos da Radiometria Óptica Espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Ed.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 1. p. 15-39.

MESQUITA, E. E.; PINTO, J. C. Nitrogênio e Métodos de Semeadura no Rendimento da Forragem de Pós-Colheita de Sementes de Milheto [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 4, p. 971 - 977, 2000.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte 1: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 2, p. 97-107, 1997.

MOREIRA, L. M.; FONSECA, D. M.; VÍTOR, C. M. T.; ASSIS, A. J.; JÚNIOR, D. M.; JÚNIOR, J. I. R.; OBEID, J. A. Renovação de Pastagem Degradada de Capim-Gordura com Introdução de Forrageiras Tropicais Adubadas com Nitrogênio ou em Consórcios. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 2, p. 442 - 453, 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2003. 370p.

MORELLI, A. F.; FORMAGGIO, A. R.; EPIFHANIO, J. C. N. Influência da geometria de visada na reflectância espectral de duas gramíneas forrageiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. **Anais...** Curitiba: SBSR. p. 80 - 95.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K., WIERENB, S. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 57, p. 263 - 272, 2003.

NICODEMUS, F. E.; RICHMOND, J. C.; HSIA, J. J.; GINSBERG, I. W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington: U.S. Department of Commerce, 1977. 52p. (NBS Monograph, 160).

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308p.

OLIVEIRA, O. C.; OLIVEIRA, I. P.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; MIRANDA, C. H. B.; VILELA, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Response of degraded pastures in the Brazilian Cerrado to chemical fertilization. **Pastures Tropicales**, Cali, v. 13, n. 1, p. 14 - 18, 2001.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Ed.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. cap. 5. p. 157 - 195.

QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P.; MANTOVANI, E. C. Agricultura de Precisão na Produção de Grãos. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: UFV, 2000. p. 1- 41.

QUEIROZ NETO, F.; MARTHA JR., G. B.; PENATI, M. A. Impact of increasing nitrogen fertilizer rates upon an irrigated Tanzanian grass pasture. Dry matter yield. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 19., 2001, Piracicaba. **Proceedings...** Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 209 - 210.

RIPPLE, W. J. Relationships of spectral reflectance to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 10, p. 1669-1675, 1986.

ROCHA, P. G.; EVANGELISTA, A. R.; LIMA, J. A.; ROSA, B. Adubação nitrogenada em gramíneas do Gênero *Cynodon*. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 3, n. 1, p. 1 - 10, 2002.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS-1 Symposium, 3., 1973, Washington, **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. v. 1, p. 309 - 317.

SANTOS, E. V. Utilização do sistema de plantio direto na renovação de pastagens. In: ZAMBOLIM, L.; SILVA, A. A.; AGNES, E.L. (Ed.). **Manejo integrado: integração agricultura-pecuária**. Viçosa: UFV, 2004. cap. 10. p. 269 - 280.

SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; MONTEIRO, F. A. Nutrição em nitrogênio do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio e idades de crescimento. **Boletim da Indústria animal**, Nova Odessa, v. 60, n. 1, p. 139 - 146, 2003.

SANTOS JUNIOR, R. F.; SANTOS, J. M.; RUDORFF, B. F. T.; MARCHIORATO, I. A. Utilização do SR com medidas de espectrorradiômetro de campo no visível e infravermelho próximo para detecção de áreas infestadas com *Meloidagyne incognita* em algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE NEMATOLOGIA, 23., 2001, Marília. **Anais...** Marília: UFSP. p. 68 - 68.

SAS Institute. **SASOnline Doc**. Version 8, SAS Institute Inc., Cary, USA, 1999.

SCHEPERS, J. S.; BLACKMER, T. M.; WILHELM, W. W.; RESENDE, M. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, p. 523 - 529, 1996.

SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. **Commun. Soil Sci. Plant Anal**, v. 23, p. 2173 - 2187, 1992.

SELLERS, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 1335 - 1372, 1985.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PEÑUELAS, J. Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. **Crop Science**, v. 40, p. 723 - 731, 2000.

SILVA, A. A.; JAKELAITIS, A.; FERREIRA, L. R. Manejo de plantas daninhas no sistema integrado agricultura-pecuária. In: ZAMBOLIM, L.; SILVA, A. A.; AGNES, E.L. (Ed.). **Manejo integrado: integração agricultura-pecuária**. Viçosa: UFV, 2004. cap. 5. p. 117-157.

SILVA JÚNIOR, M. C. **Detecção do efeito da adubação nitrogenada em *Brachiaria decumbes* utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SOARES FILHO, C. V. Tratamentos físico-mecânico, correção e adubação para recuperação de pastagens. In: ENCONTRO SOBRE RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS, 1., 1993, Nova Odessa. **Anais...** Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1993. p. 79 - 117.

SORIA, L.G.T. **Produtividade do capim-tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia) em função da lâmina de irrigação e de adubação nitrogenada.** 2002. 170 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

STAFFORD, J.V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, n. 3, p. 267 - 275, 2000.

THOMAS, J. R.; OERTHER, G. F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 11 - 13, 1972.

TOWNSEND, C. R. et al. Renovação de pastagens degradadas em consórcio com milho na Amazônia Ocidental. IN: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 18., 2000, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: ABMS, 2000. 1 CD-ROM.

TUCKER, C. J.; GARATT, M. W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. **Applied Optics**, v. 16, p. 635 - 642, 1977.

VARELLA, M. **Minas pode quadruplicar a exportação de carne.** 2006. Disponível em: <<http://www.agridata.mg.gov.br/>>. Acesso em: 12 jan. 2006.

VICENTE-CHANDLER, J.; SILVA, S.; FIGARELLA, J. Effect of frequency of application on response of Guinea grass to nitrogen fertilization. **The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, Rio Piedras, v. 46, n. 4, p. 343 - 349, 1962.

VIÑA, A.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B.; SCHEPERS, J. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 1139 - 1147, 2004.

WILSON, J. R.; MANNETJE, L. T. Senescence, digestibility and carbohydrate content of Buffel grass and Green Panic leaves in Swards. **Australian Journal of agricultural Research**, v. 29, p. 503 - 516, 1978.

YANG, C.; ANDERSON, G. L. Airborne Videography to identify spatial plant growth variability for grain sorghum. Characterizing Plant Growth. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 67 - 79, 1999.

YODER, B. J.; WARING, R. H. The Normalized Difference Vegetation Index of small Douglas-Fir canopies with varying chlorophyll concentrations. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, p. 81-91, 1994.

YODER, B. J.; PETTIGREW-CROSBY, R. E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400– 2500 nm) at leaf and canopy scales. **Remote Sensing of Environment**, v. 53, n. 3, p. 199 – 211, 1995.

7. APÊNDICES

Apêndice A

Resultados da análise de solos realizados no Laboratório de Análise de Solos Viçosa Ltda., na cidade de Viçosa em Minas Gerais.

Característica (0 a 20 cm de profundidade)	Resultado
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	3,10
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,00
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,00
H + Al (cmolc dm ⁻³)	2,80
P (mg dm ⁻³)	1,10
K (mg dm ⁻³)	146,00
pH (em água, KCl e CaCl ₂) – Relação 1:2,5	5,90
Soma das Bases Trocáveis (cmolc dm ⁻³)	4,47
Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (cmolc dm ⁻³)	4,47
Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 (cmolc dm ⁻³)	7,27
Índice de saturação de bases (%)	61,00
Índice de saturação de Alumínio (%)	0,00
Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)	3,71
Zn (mg dm ⁻³)	5,90
Fe (mg dm ⁻³)	299,10
Mn (mg dm ⁻³)	142,00
Cu (mg dm ⁻³)	4,30
B (mg dm ⁻³)	0,70
P - K - Zn - Fe - Mn - Cu – Extrator de Mehlich 1	
Ca – Mg – Al – Extrator: KCl – 1 mol/L	
H + Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0	
B – Extrator água quente	
Matéria Orgânica = C. Orgânica x 1,724 – Walkley-Black	

Apêndice B

Dados meteorológicos diários de precipitação, insolação, temperatura do ar média e umidade relativa média durante o mês de novembro de 2006 obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa.

Dia	Precipitação (mm) total	Insolação (horas) total	Temperatura do Ar Média Diária (°C)	Umidade Relativa Média Diária (%)
1	0,2	4,3	23,8	72
2	0,0	1,8	22,6	82
3	15,2	0,1	22,2	91
4	17,1	0,3	22,4	82
5	0,0	0,9	21,4	79
6	0,3	0,1	21,7	84
7	0,0	0,2	22,6	85
8	5,7	0,5	20,4	77
9	0,0	0,0	18,8	82
10	6,6	0,0	16,2	95
11	25,9	0,0	15,1	92
12	4,8	0,0	15,6	86
13	0,6	5,9	18,2	77
14	10,3	0,0	18,0	97
15	30,5	0,0	19,4	91
16	11,5	7,2	14,6	62
17	0,0	5,4	21,6	72
18	0,0	7,5	22,6	77
19	0,8	6,4	23,9	80
20	7,3	0,0	22,5	89
21	36,4	0,5	22,3	83
22	0,0	0,7	21,2	85
23	0,8	2,4	22,1	85
24	1,4	5,4	22,8	74
25	0,0	2,4	22,6	75
26	0,0	3,8	22,8	81
27	0,0	0,0	22,6	41
28	2,5	0,0	22,4	85
29	3,8	1,7	23,8	85
30	3,5	1,0	23,2	91

Apêndice C

Dados meteorológicos diários de precipitação, insolação, temperatura do ar e umidade relativa durante o mês de dezembro de 2006 obtidos da Estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa.

Dia	Precipitação (mm) total	Insolação (horas) total	Temperatura do Ar Média Diária (°C)	Umidade Relativa Média Diária (%)
1	11,2	0,0	21,4	84
2	0,2	5,1	21,2	80
3	1,0	1,5	21,8	80
4	0,2	2,1	60,0	84
5	0,0	0,9	21,6	91
6	18,0	6,6	24,2	72
7	0,3	0,6	23,4	83
8	35,4	0,1	21,7	86
9	0,0	1,0	21,9	94
10	10,5	0,4	21,4	88
11	1,2	0,0	21,2	80
12	0,0	3,0	22,0	78
13	0,6	0,1	22,4	88
14	33,0	0,0	21,3	93
15	15,8	0,0	21,0	87
16	6,0	0,0	20,8	80
17	0,7	5,2	22,5	76
18	0,0	2,9	23,1	75
19	0,0	3,5	20,7	71
20	0,0	6,0	24,1	84
21	0,0	7,2	24,5	87
22	0,6	7,1	25,5	73
23	0,0	4,9	25,7	76
24	4,2	5,1	23,6	81
25	50,5	0,0	22,6	84
26	9,8	2,4	22,6	82
27	10,0	0,7	22,6	87
28	0,0	2,0	22,8	84
29	1,3	0,2	22,5	88
30	8,3	0,0	21,2	88
31	2,6	0,0	21,1	87

Apêndice D

Dados meteorológicos diários de precipitação, insolação, temperatura do ar e umidade relativa durante o mês de janeiro de 2007 obtidos da Estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa.

Dia	Precipitação (mm) total	Insolação (horas) total	Temperatura do Ar Média Diária (°C)	Umidade Relativa Média Diária (%)
1	4,1	0,0	20,2	95
2	6,3	0,0	20,6	92
3	24,9	0,0	20,0	94
4	50,7	0,0	20,3	95
5	11,0	0,0	21,6	85
6	40,4	0,0	22,5	88
7	1,3	2,3	24,6	83
8	0,0	3,7	23,7	81
9	32,0	5,8	23,5	88
10	29,2	3,5	22,8	89
11	8,0	2,3	22,3	87
12	15,6	4,3	24,2	87
13	13,3	0,0	23,7	88
14	9,2	0,2	23,9	88
15	2,9	0,0	22,1	91
16	12,8	0,0	21,7	93
17	16,3	2,6	22,0	82
18	0,0	0,7	23,8	85
19	20,4	4,7	24,9	47
20	0,0	4,2	24,8	62
21	0,0	6,8	24,0	76
22	50,2	0,2	22,4	87
23	1,8	0,0	20,4	94
24	92,7	0,0	22,2	90
25	0,3	4,5	22,4	86
26	2,3	0,3	23,3	85
27	4,2	0,0	22,8	89
28	5,6	0,0	22,9	88
29	0,9	0,7	23,0	90
30	14,0	0,0	22,6	92
31	11,1	0,0	22,6	92

Apêndice E

Dados de reflectância média (%) para a dose de nitrogênio 0 kg ha⁻¹

Bandas (nm):	460 a 480	545 a 565	620 a 670	700 a 710	840 a 880
19/12/2006	2,73	18,38	4,65	2,73	53,09
	3,42	22,38	7,37	3,42	52,06
	2,77	17,51	5,28	2,77	52,95
	2,64	14,14	3,58	2,64	58,69
	2,62	17,30	4,40	2,62	48,54
	2,57	14,77	3,68	2,57	57,60
	2,81	15,58	3,94	2,81	56,72
	2,91	14,76	4,07	2,91	54,40
	2,56	17,01	4,39	2,56	52,42
	CV (%):	9,62	15,01	25,33	9,62

CV: Coeficiente de variação

Bandas (nm):	460 a 480	545 a 565	620 a 670	700 a 710	840 a 880
08/01/2007	2,89	14,74	4,77	2,89	42,32
	4,60	20,78	9,51	4,60	55,29
	4,29	18,55	8,62	4,29	58,37
	3,75	14,52	6,19	3,75	54,16
	3,73	16,27	6,46	3,73	59,17
	3,55	15,14	5,74	3,55	57,97
	2,66	11,77	4,19	2,66	55,11
	2,69	11,18	4,57	2,69	46,57
	2,48	12,60	4,55	2,48	54,41
	CV (%):	22,39	20,81	31,08	22,39

CV: Coeficiente de variação

Bandas (nm):	460 a 480	545 a 565	620 a 670	700 a 710	840 a 880
19/01/2007	2,48	12,28	3,83	2,48	53,35
	2,98	16,14	6,14	2,98	49,77
	2,62	14,31	5,32	2,62	49,48
	2,45	11,20	3,46	2,45	56,67
	2,49	13,30	4,47	2,49	49,22
	2,24	11,35	3,58	2,24	55,41
	2,29	10,15	3,30	2,29	54,05
	2,35	10,70	3,37	2,35	52,99
	2,39	12,24	3,81	2,39	56,11
	CV (%):	8,95	15,33	23,76	8,95

CV: Coeficiente de variação

Apêndice F

Dados da produção de massa de forragem seca do capim-tanzânia, em kg ha⁻¹, realizada em 20/01/2007.

Blocos	Dose de N (kg ha ⁻¹)	Densidades de plantas (plantas m ⁻²)	Produção de massa seca (kg ha ⁻¹)
1	0	9	794,86
2	0	9	3406,14
3	0	9	2547,77
1	0	25	715,19
2	0	25	2106,16
3	0	25	1718,45
1	0	49	781,38
2	0	49	1920,97
3	0	49	1965,09
1	80	9	3300,51
2	80	9	3855,53
3	80	9	2860,10
1	80	25	1810,46
2	80	25	3814,34
3	80	25	3092,33
1	80	49	3511,73
2	80	49	3785,79
3	80	49	2441,93
1	160	9	4430,41
2	160	9	4267,04
3	160	9	1810,43
1	160	25	2650,36
2	160	25	3266,83
3	160	25	3086,20
1	160	49	1829,15
2	160	49	5041,96
3	160	49	5147,95
1	320	9	3660,03
2	320	9	3078,95
3	320	9	1891,79
1	320	25	2127,74
2	320	25	3129,13
3	320	25	3425,71
1	320	49	4191,62
2	320	49	4408,15
3	320	49	3583,89