



Detecção do efeito da adubação nitrogenada em *Brachiaria decumbens* Stapf. utilizando um sistema de sensoriamento remoto¹

Mário Cupertino da Silva Júnior², Francisco de Assis de Carvalho Pinto³, Dilermando Miranda da Fonseca⁴, Daniel Marçal de Queiroz⁵, Bruno Ferreira Maciel⁶

¹ Projeto financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV - Viçosa, MG. Bolsista da CAPES.

³ Departamento de Engenharia Agrícola da UFV - Viçosa, MG. Bolsista do CNPq.

⁴ Departamento de Zootecnia da UFV - Viçosa, MG. Bolsista do CNPq.

⁵ Departamento de Engenharia Agrícola da UFV - Viçosa, MG. Bolsista do CNPq.

⁶ Curso de Graduação em Agronomia - UFV. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

RESUMO - Objetivou-se com este trabalho utilizar técnicas de sensoriamento remoto para detectar diferentes *status* nutricionais em pastagem de *Brachiaria decumbens* Stapf. Os tratamentos consistiram de cinco doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), com seis repetições, avaliadas em delineamento inteiramente casualizado. Foi utilizado um sistema de sensoriamento remoto composto por câmeras digitais, cabos, placa de digitalização de imagens e microcomputador, com uma haste de três metros de altura para posicionamento das câmeras. O sistema adquiriu imagens em duas bandas espectrais simultaneamente em duas fases. A primeira fase foi aos 15, 21 e 32 dias após a adubação, realizada no período de fevereiro a março de 2006, e a segunda aos 28, 36, 45 e 53 dias após a reaplicação das doses de N, no período de março a maio de 2006. Das imagens originais foram determinados diferentes índices de vegetação, os quais foram submetidos às análises de regressão e correlação. Também foram adquiridos valores estimados do teor de clorofila pelo medidor de clorofila SPAD 502 e valores do teor de N foliar. Foi possível ajustar modelos de primeiro ou segundo grau aos dados experimentais para todos os períodos estudados. Os índices calculados com a banda verde mostraram-se mais eficientes na relação com a estimativa de clorofila foliar, com o teor de N foliar e com a produtividade de matéria seca do que aqueles que utilizaram a banda vermelha, em todos os períodos estudados. Dessa maneira, a técnica de sensoriamento remoto utilizada permitiu a detecção dos diferentes efeitos das doses de nitrogênio na forrageira.

Palavras-chave: nitrogênio, imagens digitais, índices de vegetação

Detection of the nitrogen fertilization effect in *Brachiaria decumbens* using a remote sensing system

ABSTRACT - The objective of the present work was the detection of different nutritional statuses in *Brachiaria decumbens* pasture using remote sensing techniques. The area was treated with five rates of nitrogen fertilizer (0, 50, 100, 150 and, 200 kg ha⁻¹) with six repetitions and evaluated in a completely randomized statistical design. A remote sensing system composed of digital cameras, cables, a framegrabber and a computer was used with a three meter metallic support to position the cameras. The system acquired images in two spectral bands simultaneously in two phases. The first phase occurred from February to March 2006 at 15, 21 and, 32 days after fertilization and the second from March to May of 2006 at 28, 36, 45 and, 53 days after reapplication of the same N rates. Vegetation indices were evaluated from the original images, and the data was submitted to regression and correlation analyses. Estimate values of chlorophyll content using the chlorophyll meter SPAD 502 and values of the leaf N content were also acquired. First or second degree models were adjusted to the experimental data for all periods. The indices using the green band proved more efficient to detect the relationship with the estimated chlorophyll values, the leaf N content and the dry mass yield than the red band in all studied periods. Thus, the used remote sensing system technique allowed for the identification of different effects of nitrogen fertilization in the forage.

Key Words: nitrogen, digital images, vegetation indices

Introdução

O Brasil destaca-se nos setores mundiais de carne e leite, principalmente, pelo baixo custo de produção, em

consequência da exploração predominante em pastagens. Isto torna o País competitivo em nível internacional, destacando-se como maior exportador mundial de carne bovina e o sexto maior produtor de leite do mundo, com taxa anual

de crescimento de 4%, além de responder por 66% do total de leite produzido no Mercosul (Embrapa, 2004).

As áreas de pastagens ocupam grande parte das áreas agricultáveis do Brasil, entretanto, as vantagens financeiras da agricultura vêm proporcionando crescente avanço desta sobre áreas de pastagens nos últimos anos. Conseqüentemente, isso faz com que a produção de leite e de carne se desloque para regiões de solos menos férteis ou exige que os pecuaristas aumentem a produtividade e competitividade da exploração para viabilizar a pecuária em terras agricultáveis.

Vários estudos indicam que a adubação é um dos principais fatores para o aumento da produtividade de forragem, tendo o nitrogênio (N) como um dos mais importantes nutrientes, responsáveis pelo crescimento das plantas, elevando a capacidade de suporte e a qualidade da pastagem disponível para o animal (Alvim & Botrel, 2001; Soares Filho, 1999). No entanto, é necessário aplicar o N de forma otimizada economicamente, para assegurar retorno de exploração e evitar agressões ao meio ambiente. Com isso, para aumentar a produtividade, o manejo racional da adubação nitrogenada na pastagem terá papel primordial no desenvolvimento sustentável da pecuária.

O desenvolvimento das culturas, em geral, varia não só entre talhões, mas também dentro do talhão, principalmente devido à variabilidade da disponibilidade nutricional e das propriedades físico-químicas do solo. Determinar essa variabilidade no desenvolvimento da planta pode identificar algumas causas que ainda poderiam ser corrigidas em tempo hábil para otimizar a produtividade (Diker & Bausch, 2003).

Assim, pesquisas têm sido desenvolvidas para identificar o *status* nutricional relacionado ao N em diversas culturas, de forma eficaz, prática e menos onerosa. Medidores portáteis de clorofila estimam a quantidade de clorofila presente na planta com base nas propriedades espectrais de transmitância da energia eletromagnética das folhas, sendo este valor proporcional ao teor de nitrogênio, entretanto, este método exige o contato físico com as folhas. Outros métodos promissores são as técnicas de sensoriamento remoto, que também capturam informações espectrais dos pigmentos das plantas, porém, sem ter contato com as mesmas mensurando a reflectância da cultura.

Para aplicação de sensoriamento remoto em estudos de culturas agrícolas, tem-se feito uso extensivo dos índices de vegetação para avaliar a reflectância do dossel, pois estes são combinações entre bandas espectrais que servem para realçar as feições de vegetação e também minimizar efeitos do solo, angulares e atmosféricos (Epiphânio et al., 1996). Segundo Moges et al. (2004), índices vegetativos da

diferença normalizada baseados nas reflectâncias do vermelho (NDVI) e verde (GNDVI) são comumente utilizados para avaliar o *status* nutricional das plantas e da biomassa e a concentração de nutrientes.

Neste contexto, neste trabalho foi avaliada a hipótese de discriminação entre efeitos de diferentes doses de adubo nitrogenado através de imagens digitais (índices espectrais), utilizando um sistema de sensoriamento remoto terrestre. Essa hipótese baseia-se no fato de que, quanto maior o teor de N disponível para a planta, mais intensa será a tonalidade verde nas plantas, mantendo constantes outras variáveis como espécie, variedade e período.

Dessa forma, objetivou-se com este trabalho detectar diferentes *status* nutricionais relativos à aplicação de N em *Brachiaria decumbens*, com a utilização de sensoriamento remoto, bem como avaliar a correlação deste método com outros bastante utilizados, como o do medidor de clorofila (SPAD) e a análise do teor de N foliar, em diferentes dias após a adubação.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no Setor Forragicultura do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa - MG, no período de fevereiro a maio de 2006, em uma área de pastagem estabelecida com *Brachiaria decumbens*.

Inicialmente foi realizada uma amostragem de solo na área experimental para caracterização de suas propriedades químico-físicas e, de posse dos resultados, foram aplicados, segundo Cantarutti et al. (1999), 50 kg ha⁻¹ de superfosfato simples, distribuídos uniformemente em toda a área. As plantas de *Brachiaria decumbens* (capim-braquiária) foram roçadas a 10 cm de altura para uniformização.

Os tratamentos consistiram de cinco doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), sob a forma de uréia (40% de N), avaliadas em delineamento inteiramente casualizado com seis repetições, perfazendo um total de 30 parcelas de 3 x 3 m.

Após a adubação nitrogenada em 17/02/2006, iniciou-se a primeira fase do experimento, obtendo-se imagens digitais e estimativas do teor de clorofila e coletando-se folhas para análise do teor de nitrogênio foliar aos 15, 21 e 32 dias após a adubação (DAA).

Aos 32 DAA, foi realizada colheita das plantas a 20 cm de altura do solo em uma área útil de 1 m² dentro de cada parcela. Segundo Morais et al. (2006), o corte das plantas a 20 cm de altura do solo favorece a renovação dos perfilhos no próximo crescimento. Após a colheita, a forragem foi

pesada, retirada uma sub-amostra de 300 a 500 g, acondicionada em sacos de papel, pesada e colocada para secar em estufa a 65°C por 72 horas. Depois de secas, as amostras foram novamente pesadas para estimativa da produção de matéria seca (MS). Após a amostragem neste primeiro corte, a área não colhida da parcela (bordadura) também foi cortada a 20 cm do solo e iniciada uma segunda fase de avaliação. Esta teve início em 28/03/06, com reaplicação das mesmas doses de nitrogênio acrescidas de 60 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio em todas as parcelas.

Em decorrência de alterações climáticas nesta segunda fase, principalmente redução de luminosidade e temperatura, a aquisição dos dados ocorreu nos períodos de 28, 36, 45 e 53 dias após a adubação (DAA), sendo que a produtividade de MS nesta fase foi medida aos 53 DAA, da mesma forma que na primeira.

As imagens em ambas as fases foram adquiridas em condições de céu aberto, entre 10 e 14 h e em presença de sol. Não foi necessário irrigar as plantas durante o período experimental, em razão da magnitude e distribuição adequada da precipitação pluvial ocorrida durante as avaliações. As plantas daninhas foram controladas manualmente em todas as parcelas sempre que necessário.

Como forma de verificar a existência de relação funcional entre a variável doses de nitrogênio e as variáveis índices de vegetação, foram realizadas análises de variância da regressão com o teste F para a falta de ajustamento. Foi avaliada também a correlação entre índices e valores SPAD e entre índices e N foliar. Todas as análises foram feitas separadamente para cada variável, em cada período após a aplicação do adubo.

O sistema de sensoriamento remoto foi constituído por um sistema de aquisição de imagens composto por um conjunto de câmeras digitais (monocromáticas e colorida).

Para posicionar as câmeras, foi utilizada uma haste com três metros de altura, com as câmeras fixadas na parte superior da mesma, tendo suas lentes voltadas para baixo, focalizando o alvo (parcelas), conforme a Figura 1.

O sistema de aquisição de imagens utilizado foi o STH-DCSG-VAR/-C *stereo head* do fabricante Videre Design (2005), Califórnia, EUA. Neste sistema foram utilizadas três câmeras do modelo STH-DCSG-VAR/-C, duas monocromáticas e uma colorida, que atuavam sempre duas a duas, capturando duas imagens, simultaneamente, da mesma cena (Tabela 1). Nas câmeras monocromáticas, foram acoplados filtros ópticos que limitavam a faixa do espectro, que sensibilizava o sensor da câmera.

Para limitar a faixa do verde (G), utilizou-se um filtro passa-faixa centrado no comprimento de onda 535 nm e com largura de 100 nm; para a faixa do vermelho (R), um filtro passa-faixa centrado no comprimento 660 nm e com largura de 100 nm; e para a faixa do infravermelho próximo (NIR), um filtro passa-alta com início no comprimento de onda de 695 nm e término aos 1.050 nm. As faixas do espectro que sensibilizavam o sensor da câmera colorida, de acordo com Videre Design (2005), estão entre 390 e 530 nm, com o pico de sensibilidade localizado por volta dos 470 nm para a faixa do azul (B), entre 490 e 610 nm com o pico em aproximadamente 540 nm para a faixa do verde (G) e entre 590 e 750 nm com o pico em cerca de 620 nm para a faixa do vermelho (R).

As imagens foram transformadas em índices com base nos valores dos pixels das diferentes bandas. Assim, foram obtidos três índices, que são a relação entre duas bandas do espectro. Portanto, obteve-se o mesmo índice de duas formas diferentes, um com as imagens da câmera colorida e outro com as das câmeras monocromáticas.

As câmeras foram conectadas a um microcomputador portátil através de cabos conectados em uma placa de

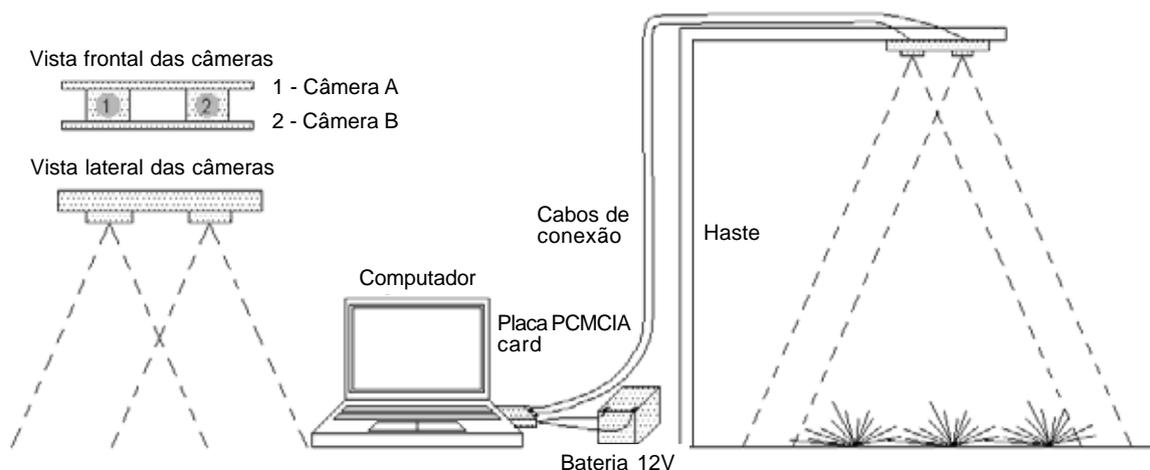


Figura 1 - Esquema representativo do sistema de sensoriamento remoto utilizado para adquirir imagens em diferentes bandas espectrais.

Tabela 1 - Bandas espectrais adquiridas por par de câmeras utilizado no sistema de sensoriamento remoto

Banda espectral adquirida	Câmera 1	Câmera 2
NIR, R, G, B	Monocromática com filtro NIR	Colorida
NIR, R	Monocromática com filtro NIR	Monocromática com filtro R
NIR, G	Monocromática com filtro NIR	Monocromática com filtro G

NIR: banda espectral do infravermelho próximo; R: banda espectral do vermelho; G: banda espectral do verde; B: banda espectral do azul.

interface digital PCMCIA card IEEE 1394. Para o funcionamento das câmeras, foi necessária uma alimentação externa, por meio de uma bateria de 12 Volts acoplada à placa PCMCIA card. O padrão das lentes utilizadas foi C-mount, com a distância focal de 2,8 mm. As imagens foram salvas no formato BMP (Bitmap), com dimensão de 480(V) x 640(H) pixels, utilizando-se o software SRI's Small Vision System (SVS) fornecido pelo próprio fabricante das câmeras. Os sensores das câmeras formadores das imagens era o CMOS MT9V022 no formato de 1/3 de polegada. Com isto foi possível obter em todas as imagens a parcela inteira de 3 x 3 m, visto que as imagens enquadravam uma área de aproximadamente 3,18 x 4,87 m, com resolução espacial de aproximadamente 7 mm pixel⁻¹.

As características das câmeras, tempo de exposição, ganho e correção do gamma, foram ajustadas para 50, 17 e 1, respectivamente. Com exceção da correção do gamma, estes valores são expressos em porcentagem e, para que não ocorresse saturação nos valores dos pixels da imagem, foram escolhidos com base em testes preliminares. Foi mantido o mesmo ajuste do foco, posicionado no "NEAR" da lente, durante todas as aquisições das imagens. A abertura da entrada de luz (diafragma) era regulada antes do início da coleta de imagens em todas as trocas de pares das câmeras e, como não havia numeração no equipamento, a regulagem era feita pela análise da imagem formada no computador, observando o efeito do ruído (saturação do pixel) pela quantidade de luz.

O processamento das imagens de ambos os sistemas de sensoriamento remoto foi realizado por intermédio do programa computacional Matlab (The MathWorks, EUA) e do pacote de ferramentas para processamento de imagens digitais.

Dentro de cada imagem, cortou-se um bloco de 240 x 240 pixels para representar cada parcela, excluindo a bordadura.

Considerou-se que a iluminação se manteve constante durante cada período de aquisição das imagens, assim, o valor do pixel decorreu apenas das propriedades espectrais do objeto. Dessa maneira, no processamento de imagens, para efetuar os cálculos dos índices, considerou-se que a refletância do dossel foi igual à média dos pixels do bloco recortado.

Os índices estudados foram o NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada), GNDVI (índice de vegetação da diferença de verde normalizado) e SAVI (índice de vegetação ajustado para o solo), de acordo com as equações 1, 2 e 3:

$$NDVI = \frac{IV - Vm}{IV + Vm} \quad (1)$$

$$GNDVI = \frac{IV - Vd}{IV + Vd} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{IV - Vm}{IV + Vm + L} (1 + L) \quad (3)$$

em que Vm é o valor numérico do pixel na banda do vermelho; IV, o valor numérico do pixel na banda do infravermelho próximo; Vd, o valor numérico do pixel na banda do verde; L, a constante de ajuste; NDVI, o índice de vegetação da diferença normalizada; GNDVI, o índice de vegetação da diferença de verde normalizado; e SAVI, o índice de vegetação ajustado para o solo.

O valor do coeficiente "L" escolhido foi de 0,5 – valor utilizado para vegetação com densidade intermediária e, segundo Huete (1988), minimiza a influência do solo de fundo para grande variação de índices de área foliar.

Os índices vegetativos foram utilizados para realçar na imagem a informação a respeito do *status* nutricional das plantas e atenuar a influência da variação da iluminação natural. Como os sistemas podem adquirir imagens em duas bandas espectrais simultaneamente, foram testados os pares de bandas: NIR e R (câmera colorida), NIR e G (câmera colorida), NIR e R (câmera monocromática com filtro R) e NIR e G (câmera monocromática com filtro G).

As estimativas do teor de clorofila foram obtidas utilizando um medidor de clorofila SPAD 502 (Minolta Corporation, Japan), nos mesmos períodos das imagens, aos 15, 21, 32 DAA na primeira fase e aos 28, 36, 45, 53 DAA na segunda fase do experimento. Este aparelho mede valores SPAD, que representam uma medida indireta do teor de clorofila na folha e, conseqüentemente, podem indicar o *status* de nitrogênio, devido à proporcionalidade que o nitrogênio possui em relação à clorofila (Costa et al., 2001).

Foram efetuadas 30 leituras no SPAD em cada parcela, sendo que cada valor foi medido em diferentes folhas ao longo de cada parcela e as folhas escolhidas foram as mais novas completamente expandidas com o equipamento posicionado na porção intermediária da folha. Após a obtenção dos 30 valores, calculou-se a média para representar o teor de clorofila nas plantas de cada parcela.

Em cada parcela, as mesmas 30 folhas utilizadas para estimar o teor de clorofila com o medidor SPAD 502 foram posteriormente colhidas e acondicionadas em sacos de papel, para determinar o teor de N em laboratório.

Foram efetuadas análises de regressão para verificar a existência de relação funcional significativa entre as variáveis dependentes (índices de vegetação) e a variável independente (doses de N), em todos os períodos analisados após a adubação, utilizando-se o programa computacional Matlab (The MathWorks, EUA), para desenvolver os algoritmos.

Os algoritmos efetuaram todos os cálculos dos testes F, para a falta de ajustamento e a análise de variância da regressão, e também os testes t para os coeficientes dos modelos, todos a 1% de probabilidade. Primeiramente, adotou-se o modelo de regressão linear simples; caso a variável não se ajustasse, o modelo era considerado inadequado e, em seguida, procurava-se ajustar o modelo de segundo grau.

Não foram testados modelos superiores ao de segundo grau, por estes não representarem o fenômeno biológico da cultura, pois, em geral, a resposta com a elevação de doses de N é no máximo quadrático.

As variáveis dependentes analisadas em todos os períodos de aquisição dos dados foram os índices NDVI_{color}, GNDVI_{color}, SAVI_{color}, NDVI_{mono}, GNDVI_{mono} e SAVI_{mono}. Os subscritos “color” e “mono” especificam se as bandas R e G utilizadas no cálculo dos índices foram provenientes da câmera colorida ou monocromática, respectivamente.

A relação entre as variáveis também foi avaliada pela correlação entre os índices vegetativos e valores de SPAD e N foliar, em cada período de aquisição dos dados, e entre os índices e a MS produzida no último período de aquisição de cada fase. Também foi efetuada a correlação entre valores de SPAD e N foliar em cada período e entre SPAD, N foliar e MS no último período.

Resultados e Discussão

Todos os valores dos índices vegetativos ajustaram-se a modelos de primeiro e/ou segundo graus aos 15 DAA, indicando que os dosséis das plantas foram influenciados pela aplicação de N, proporcionando variações nos valores

digitais em cada tratamento (Tabela 2). Fonseca et al. (2002), avaliando a resposta espectral de um tipo de forrageira sob efeito de diferentes doses de adubação nitrogenada, verificaram que esta é alterada de acordo com a variação da biomassa, causada pela adubação, comprovando que a análise da reflectância é um bom indicador das alterações em um dossel. Cunha (2004), em um experimento com capim-tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio, verificou que a resposta espectral deste tipo de forragem é alterada conforme variações na quantidade de biomassa do dossel causadas pela influência das doses de nitrogênio. Além disso, o autor cita que, no dossel deste capim, é possível estabelecer relações significativas entre as variáveis espectrais, obtidas por sensoriamento remoto e variáveis agrônômicas; com este procedimento, parâmetros espectrais podem servir como bons descritores das condições de vigor e de desenvolvimento da forrageira. Mutanga et al. (2003) também observaram que a reflectância do dossel de uma forrageira tropical (*Cenchrus ciliaris*) pode ser utilizada para discriminar diferentes concentrações de nitrogênio foliar.

Aos 21 e 32 DAA, somente os índices NDVI_{mono} e SAVI_{mono} não explicaram as variações dos efeitos do N aplicado com modelos de primeiro e segundo graus. Contudo, o NDVI_{color} e SAVI_{color} foram capazes de

Tabela 2 - Índices de vegetação em função das doses de N aos 15, 21 e 32 dias após a adubação (DAA)

Equação	R ²
15 DAA	
NDVI _{color} = 0,2886 + 0,0028 N - 8,6410x10 ⁻⁶ N ²	0,91
GNDVI _{color} = 0,2025 + 0,0029 N - 8,6190x10 ⁻⁶ N ²	0,92
SAVI _{color} = 0,4315 + 0,0042 N - 1,2886x10 ⁻⁵ N ²	0,91
NDVI _{mono} = 0,2521 + 0,0048 N - 1,4883x10 ⁻⁵ N ²	0,93
GNDVI _{mono} = 0,0309 + 0,0014 N	0,92
SAVI _{mono} = 0,3771 + 0,0072 N - 2,2255x10 ⁻⁵ N ²	0,93
21 DAA	
NDVI _{color} = 0,3132 + 0,0010 N	0,83
GNDVI _{color} = 0,2253 + 0,0012 N	0,87
SAVI _{color} = 0,4686 + 0,0016 N	0,83
GNDVI _{mono} = 0,1665 + 0,0030 N - 8,7533x10 ⁻⁶ N ²	0,97
32 DAA	
NDVI _{color} = 0,1819 + 0,0012 N	0,88
GNDVI _{color} = 0,0845 + 0,0015 N	0,91
SAVI _{color} = 0,2721 + 0,0018 N	0,88
GNDVI _{mono} = 0,0078 + 0,0026 N - 6,6143x10 ⁻⁶ N ²	0,96

NDVI: índice de vegetação da diferença normalizado; GNDVI: índice de vegetação da diferença de verde normalizado; SAVI: índice de vegetação de ajuste de solo. Os subscritos “color” e “mono” especificam que as bandas R e G utilizadas no cálculo dos índices foram provenientes das câmeras colorida e monocromática, respectivamente. Os coeficientes b₁ e b₂ dos modelos ajustados foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste t “student”.

detectar o efeito das diferentes doses de N nestes períodos. Este fato infere que o problema da não-deteccção pelos índices NDVI e SAVI “mono” não se deve à banda vermelha utilizada, mas sim à faixa utilizada desta banda no cálculo dos índices. Com isso, o solo pode ter apresentado efeito neste comportamento, tendo em vista que, ao estreitar a banda vermelha com os filtros ópticos, foi realçada a influência do solo, que tem maior reflectância nesta banda. No primeiro período (15 DAA), havia maior exposição de solo, dependendo da dose de nitrogênio, o que pode ter acarretado maior poder de discriminação dos índices que utilizaram faixas mais restritas da banda vermelha.

Aos 15 DAA, o $GNDVI_{mono}$ apresentou o maior valor de correlação com os valores de N foliar (0,83) e o menor (0,81) em relação ao SPAD (Tabela 3). O maior valor de correlação encontrado foi entre $NDVI_{mono}$ e $SAVI_{mono}$ e os valores de SPAD (0,90). Isto mostra que, neste período de formação dos índices, a faixa espectral da banda vermelha sensibilizada pelo sensor das câmeras, ao ser estreitada pelo filtro óptico, aumentou a relação com os valores de SPAD, não ocorrendo o mesmo com o estreitamento da banda verde, que demonstrou diminuição na relação entre os índices e SPAD. Entretanto, neste mesmo período, em relação ao N foliar, foi observado o oposto do acontecido com o SPAD: ao estreitar tanto a banda vermelha quanto a verde, aumentou-se a relação dos índices com os valores de N foliar.

Esta mesma situação observada aos 15 DAA, da relação entre os índices e o N foliar, também foi verificada em todos os outros períodos de aquisição dos dados (21 e 32 DAA), tanto em relação ao SPAD quanto ao N foliar e MS, com exceção dos índices NDVI e SAVI “mono”, que não ajustaram os modelos. Constata-se que nesta fase houve tendência de os índices “mono” apresentarem maior correlação que os “color” tanto para o SPAD como para o N foliar e MS no último período. Isso indica que o uso de filtros no

estreitamento da banda que sensibiliza o sensor da câmera favoreceu o relacionamento com as variáveis SPAD, N foliar e MS.

Os índices SAVI e NDVI “color” e “mono” apresentaram valores similares dos coeficientes de determinação e de correlação em todos os períodos analisados, em decorrência do valor da constante L escolhida para o cálculo do índice SAVI. Segundo Huete (1988), o fator de ajuste L igual a 0,5 reduz a influência da reflectância do solo para uma larga faixa de valores de índice de área foliar, pois o índice SAVI tem a função de minimizar a influência da reflectância do solo de fundo em índices de vegetação da diferença normalizada pela adição da constante L. Constata-se, assim, que a cobertura proporcionada pela forrageira pode ter minimizado esta influência e o valor de L não gerou contribuição na deteccção dos diferentes status nutricionais.

As correlações entre o SPAD e o N foliar foram de 0,92; 0,95 e 0,85 para os períodos 15, 21 e 32 DAA, respectivamente. Aos 32 DAA, as correlações entre SPAD e MS e entre N foliar e MS foram de 0,78 e 0,70, respectivamente. Estes valores mostram a potencialidade do aparelho SPAD 502 para estimar o teor de N foliar e a produtividade de MS. Este fato também foi verificado por outros autores tanto em forrageiras como em outras culturas (Rodrigues, 2002; Lavres Jr. & Monteiro, 2006; Soratto et al., 2004; Carvalho et al., 2003).

Em geral, as correlações entre as variáveis foram altas, com tendência de redução com o avanço dos dias após a adubação. Este fato foi observado em outros estudos de comportamento espectral de plantas (Meneses & Madeira Neto, 2001; Gitelson, 2004), nos quais se constatou que o aumento do número de folhas leva à saturação nos valores dos índices, diminuindo a resposta dos índices com o avanço do desenvolvimento das plantas.

Nesta primeira fase, os índices $GNDVI$ tanto “mono” como “color” foram os mais indicados entre os estudados para detectar diferentes *status* nutricionais na *Brachiaria*

Tabela 3 - Correlações entre os índices de vegetação que ajustaram modelos e SPAD, N foliar e matéria seca (MS) aos 15, 21 e 32 dias após adubação (DAA)

Índices	15 DAA		21 DAA		32 DAA		MS
	SPAD	N foliar	SPAD	N foliar	SPAD	N foliar	
$NDVI_{color}$	0,87**	0,74**	0,80**	0,81**	0,69**	0,63**	0,62**
$GNDVI_{color}$	0,87**	0,76**	0,82**	0,83**	0,73**	0,66**	0,66**
$SAVI_{color}$	0,87**	0,74**	0,80**	0,81**	0,69**	0,63**	0,62**
$NDVI_{mono}$	0,90**	0,81**					
$GNDVI_{mono}$	0,81**	0,83**	0,91**	0,90**	0,93**	0,79**	0,82**
$SAVI_{mono}$	0,90**	0,81**					

** correlação significativa a 1% de probabilidade; NDVI: índice de vegetação da diferença normalizado; $GNDVI$: índice de vegetação da diferença de verde normalizado; SAVI: índice de vegetação de ajuste de solo; SPAD: variável obtida pelo medidor de clorofila SPAD; N foliar: análise do teor de N foliar; MS: matéria seca produzida em toneladas por hectare. Os subscritos “color” e “mono” especificam que as bandas R e G utilizadas no cálculo dos índices foram provenientes da câmera colorida e monocromática, respectivamente.

decumbens, podendo ainda inferir a produtividade de MS. Gitelson et al. (1996) também verificaram que o GNDVI foi muito mais sensível que o NDVI para identificar diferentes taxas de concentração de clorofila em duas espécies de plantas.

Na segunda fase experimental, observou-se que todas as variáveis dependentes em todos os períodos de avaliações apresentaram modelos ajustados ao primeiro ou segundo grau (Tabela 4). Este fato evidencia que houve maior eficiência de detecção dos diferentes *status* nutricionais nos períodos estudados desta fase, causados pelo efeito da adubação nitrogenada, provavelmente devido à influência dos resíduos dos tratamentos da fase anterior que poderiam ainda ter permanecido nas parcelas, favorecendo a distinção entre os *status* nutricionais.

Diferentemente da primeira fase, os índices “color”, em geral, apresentaram tendência de maior correlação que os índices “mono”, tanto para o SPAD como para o N foliar e MS no último período (Tabela 5). Esta falta de tendência do uso de uma faixa mais estreita ou mais larga para captar a energia refletida ocorreu pela impossibilidade de se padronizar a abertura de entrada da luz. Em trabalhos futuros, deve-se adotar uma metodologia para intercalibrar os sensores das câmeras, o que permitirá concluir sobre o melhor par de câmeras.

O maior valor de correlação encontrado nesta fase foi entre o GNDVI_{mono} e SPAD aos 28 DAA, de 0,81, entretanto, as maiores correlações foram encontradas pelo GNDVI_{color}. Isto demonstra novamente a maior sensibilidade do uso da banda verde, em comparação à banda vermelha, para relacionar com os valores nutricionais obtidos pontualmente nas folhas e na detecção dos diferentes níveis nutricionais. Morgan (2002) também observou que o GNDVI esteve altamente correlacionado com a biomassa e doses de nitrogênio para três tipos de forrageiras testadas, independentemente da fonte de N, sendo um sensível preditor de biomassa. Esse autor considerou correlação alta quando esta foi maior que 70%.

Apesar de todas as variáveis dependentes terem detectado os diferentes *status* nutricionais nesta fase, ao se compararem as correlações entre índices e SPAD, N foliar e MS da primeira fase, foi possível verificar que houve diminuição nos valores desses coeficientes. Esta menor correlação provavelmente decorreu da mudança climática observada nesta fase, que propiciou menor resposta das plantas à adubação nitrogenada, devido à diminuição de temperatura e luminosidade, dificultando o discernimento entre os tratamentos.

Foi observado também declínio nos valores dos índices, independentemente do par de câmeras utilizado, da primeira

Tabela 4 - Índices de vegetação em função das doses de N aos 28, 36, 45 e 53 dias após adubação (DAA)

Equação	R ²
28 DAA	
NDVI _{color} = 0,1450 + 0,0027 N - 8,9924x10 ⁻⁶ N ²	0,94
GNDVI _{color} = 0,0695 + 0,0026 N - 8,6619x10 ⁻⁶ N ²	0,95
SAVI _{color} = 0,2168 + 0,0040 N - 1,3460x10 ⁻⁵ N ²	0,94
NDVI _{mono} = 0,3678 + 0,0038 N - 1,4528x10 ⁻⁵ N ²	0,98
GNDVI _{mono} = -0,1306 + 0,0030 N - 1,0719x10 ⁻⁵ N ²	0,96
SAVI _{mono} = 0,5498 + 0,0057 N - 2,1726x10 ⁻⁵ N ²	0,98
36 DAA	
NDVI _{color} = 0,1940 + 0,0029 N - 9,7267x10 ⁻⁶ N ²	0,93
GNDVI _{color} = 0,1154 + 0,0029 N - 9,2648x10 ⁻⁶ N ²	0,94
SAVI _{color} = 0,2899 + 0,0044 N - 1,4550x10 ⁻⁵ N ²	0,93
NDVI _{mono} = 0,7162 + 0,0025 N - 8,2781x10 ⁻⁶ N ²	0,97
GNDVI _{mono} = 0,3255 + 8,0540x10 ⁻⁴ N	0,76
SAVI _{mono} = 1,0694 + 0,0037 N - 1,2438x10 ⁻⁵ N ²	0,97
45 DAA	
NDVI _{color} = 0,1697 + 0,0032 N - 1,0800x10 ⁻⁵ N ²	0,93
GNDVI _{color} = 0,0905 + 0,0032 N - 1,0170x10 ⁻⁵ N ²	0,94
SAVI _{color} = 0,2532 + 0,0048 N - 1,6152x10 ⁻⁵ N ²	0,93
NDVI _{mono} = 0,4459 + 0,0034 N - 1,0536x10 ⁻⁵ N ²	0,94
GNDVI _{mono} = 0,2789 + 0,0010 N	0,82
SAVI _{mono} = 0,6648 + 0,0052 N - 1,5751x10 ⁻⁵ N ²	0,94
53 DAA	
NDVI _{color} = 0,0732 + 0,0026 N - 7,7805x10 ⁻⁶ N ²	0,93
GNDVI _{color} = 0,0050 + 0,0025 N - 7,1014x10 ⁻⁶ N ²	0,94
SAVI _{color} = 0,1092 + 0,0038 N - 1,1630x10 ⁻⁵ N ²	0,93
NDVI _{mono} = 0,5914 + 0,0014 N	0,82
GNDVI _{mono} = 0,2634 + 9,8700x10 ⁻⁴ N	0,94
SAVI _{mono} = 0,8798 + 0,0020 N	0,82

NDVI: índice de vegetação da diferença normalizado; GNDVI: índice de vegetação da diferença de verde normalizado; SAVI: índice de vegetação de ajuste de solo. Os subscritos “color” e “mono” especificam que as bandas R e G utilizadas no cálculo dos índices foram provenientes das câmeras colorida e monocromática, respectivamente. Os coeficientes b₁ e b₂ dos modelos ajustados foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste t “student”.

para a segunda fase. O mesmo foi observado por Cunha (2004), que, ao estudar o comportamento espectral no capim-tanzânia, verificou diminuição dos valores do índice NDVI entre períodos. O autor citou que esse fato poderia estar relacionado às diferentes condições ambientais presentes como menor radiação solar incidente e menores temperaturas, ocasionando menor produção de fitomassa e, conseqüentemente, baixos valores da reflectância no infravermelho próximo.

Os índices NDVI e SAVI novamente apresentaram valores de coeficiente de determinação e de correlação similares em todos os períodos analisados, como os obtidos na primeira fase. Conforme mencionado anteriormente, isto ocorreu pela pouca influência do solo na determinação destes índices.

Os valores de correlação entre SPAD e N foliar, respectivamente, aos 28, 36, 45 e 53 DAA foram de 0,91;

Tabela 5 - Correlações entre índices de vegetação que ajustaram modelos e SPAD, N foliar e matéria seca (MS) aos 28, 36, 45 e 53 dias após adubação (DAA)

Índices	SPAD		N foliar		SPAD		N foliar		MS
	28 DAA		36 DAA		45 DAA		53 DAA		
NDVI _{color}	0,79**	0,74**	0,80**	0,64**	0,74**	0,64**	0,75**	0,59**	0,72**
GNDVI _{color}	0,80**	0,75**	0,79**	0,65**	0,77**	0,68**	0,77**	0,62**	0,75**
SAVI _{color}	0,79**	0,74**	0,80**	0,64**	0,74**	0,64**	0,75**	0,59**	0,72**
NDVI _{mono}	0,66**	0,57**	0,75**	0,58**	0,76**	0,65**	0,70**	0,56**	0,68**
GNDVI _{mono}	0,81**	0,69**	0,72**	0,57**	0,77**	0,69**	0,68**	0,52**	0,66**
SAVI _{mono}	0,66**	0,57**	0,75**	0,58**	0,76**	0,65**	0,70**	0,56**	0,68**

** correlação significativa ao nível de 1% de probabilidade; NDVI: índice de vegetação da diferença normalizado; GNDVI: índice de vegetação da diferença de verde normalizado; SAVI: índice de vegetação de ajuste de solo; SPAD: variável obtida pelo medidor de clorofila SPAD; N foliar: análise do teor de N foliar; MS: matéria seca produzida em toneladas por hectare. Os subscritos "color" e "mono" especificam que as bandas R e G utilizadas no cálculo dos índices foram provenientes da câmera colorida e monocromática, respectivamente.

0,87; 0,91 e 0,83. Aos 53 DAA, o valor de correlação obtido entre SPAD e MS foi de 0,76 e entre N foliar e MS, de 0,59. Todos estes valores de correlação também foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste t. Comparando estes valores de correlação com os obtidos na primeira fase, verificou-se também que, em geral, os valores tenderam a reduzir, mostrando que houve diminuição das relações entre estas variáveis, provavelmente devido às mudanças climáticas.

Conclusões

Os índices de vegetação NDVI, GNDVI e SAVI "color" e o GNDVI_{mono} gerados pelo sistema de sensoriamento remoto proposto foram capazes de detectar variação no status nutricional em *Brachiaria decumbens*, em todos os períodos testados.

Na formação do índice de vegetação da diferença normalizada, a banda verde mostrou-se mais eficiente na relação com a estimativa nutricional foliar, o teor de N foliar e a produtividade de MS que a banda vermelha.

O índice de vegetação que melhor se correlacionou com o SPAD, N foliar e MS foi o GNDVI_{mono}.

Literatura Citada

- ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A. Efeitos de doses de nitrogênio na produção de leite de vacas em pastagem de *coast-cross*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p.577-583, 2001.
- CANTARUTTI, R.B.; MARTINS, C.E.; CARVALHO, M.M. et al. Pastagens. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (Eds.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa, MG: 1999. p.332-341.
- CARVALHO, M.A.C.; FURLANI JR., E.; ARF, O. et al. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio e teores foliares deste nutriente e de clorofila em feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.445-450, 2003.
- COSTA, C.; DWYER, L.M.; DUTILLEUL, P. et al. Interrelationships 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**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004. 154p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.
- DIKER, K.; BAUSCH, W.C. Potential of use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. **Biosystem Engineering**, v.84, n.4, p.437-447, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. [2004]. Disponível em: <http://www.embrapa.br/linhas_de_acao/alimentos/prod_animal/index_html/mostra_documento. Acesso em: 3/7/2006.
- EPIPHÂNIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.6, p.445-454, 1996.
- 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.
- GITELSON, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. **Journal of Plant Physiology**, v.161, n.2, p.165-173, 2004.
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; MERZLYAK, M.N. Use of channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing Environment**, v.58, n.3, p.289-298, 1996.
- HUETE, A.R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing Environment**, v.25, p.295-309, 1988.
- LAVRES JR., J.; MONTEIRO, F.A. Diagnose nutricional de nitrogênio no capim-aranã em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.5, p.829-837, 2006.
- MENESES, R.; MADEIRA NETO, J.S. **Sensoriamento remoto – reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Embrapa, 2001. 262p.
- MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W. et al. Evaluation of green, red and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v.27, n.8, p.1431-1441, 2004.
- MORAIS, R.V.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO JR., D. et al. Demografia de perfilhos basulares em pastagens de *Brachiaria decumbens* adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.2, p.380-388, 2006.
- MORGAN, S.P. **Estimating forage biomass and nitrogen concentration using false color infrared photography**. Raleigh: North Carolina State University, 2002. 152p. Thesis (Master of Science in Crop Science) - North Carolina State University, 2002.

- MUTANGA, O.; SKIDMOREA, A.K.; WIERENB, S. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, p.263-272, 2003.
- RODRIGUES, R.C. **Calcário, nitrogênio e enxofre para a recuperação do capim-Braquiária cultivado em solo proveniente de uma pastagem degradada**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002. 141p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
- SOARES FILHO, C.V. Tratamentos físico-mecânicos, correção e adubação para recuperação de pastagens. In: PAULINO, V.T.; FERREIRA, L.G. (Eds.) **Recuperação de pastagens**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1999. p.37-60.
- SORATTO, R.P.; CARVALHO, M.A.C.; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.9, p.895-901, 2004.
- VIDERE DESIGN. **STH-DCSG-VAR/-c stereo head user's manual**. Califórnia: 2005. 27p.