

MODELO PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL PRODUTIVO EM TRIGO E CEVADA POR MEIO DO SENSOR GREENSEEKER¹

DANIEL S. GROHS², CHRISTIAN BREDEMEIER³, CLAUDIO M. MUNDSTOCK⁴,
NARACELIS POLETO⁵

RESUMO: Áreas com diferentes potenciais de rendimento dentro de uma lavoura necessitam ser manejadas separadamente, para fins de aplicação da adubação nitrogenada em cobertura. O equipamento baseado em sensoriamento remoto terrestre (GreenSeeker) é um dos instrumentos utilizados para separar diferentes zonas de manejo. Para fazer isso, o sensor permite a definição de classes para estimar o potencial produtivo de forma ágil, precisa e em tempo real. Com o instrumento, foi desenvolvido um modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada, correlacionando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com a biomassa seca acumulada na parte aérea, por ocasião da emissão da sexta folha do colmo principal. A base do modelo foi a formação de classes de potencial produtivo correspondentes a zonas específicas de manejo da lavoura. Essas classes não necessitam ser específicas para diferentes cultivares e/ou espécies, visto que não se detectaram diferenças que justificassem a formação de grupos para elas. As superfícies de fundo (resíduos de restevras de soja e milho) tiveram efeitos significativos nas leituras do sensor. O modelo continua válido mesmo se as leituras de NDVI forem feitas antes ou após o período recomendado para tal, podendo ser ajustado com sub ou superestimação. As análises de variabilidade espacial, futuramente, podem avaliar se, as zonas de potencial produtivo estimadas pelas classes de NDVI propostas pelo modelo, correspondem à flutuação espacial da biomassa, doses de N aplicadas e rendimento de grãos.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, adubação nitrogenada em taxa variável, NDVI.

MODEL FOR YIELD POTENTIAL ESTIMATION IN WHEAT AND BARLEY USING THE GREENSEEKER SENSOR

ABSTRACT: Areas with different yield potential within a field need to be managed separately as for nitrogen application in small grain cereals. Terrestrial remote sensing-based equipment such as the GreenSeeker sensor is one of the tools available to handle different management zones. To do this, the sensor allows the definition of classes to estimate yield potential. A model which correlated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to shoot dry biomass at the 6-leaf-stage was developed for estimating yield potential classes for wheat and barley. The model eliminated differences between species and cultivars as no correction for these factors is necessary. The effects of surface background (corn or soybean crop residues) were considered in this model. When readings are carried out before or after the recommended period, the model can be adjusted for under or overestimation. Spatial variability analysis may evaluate if yield potential zones estimated by the NDVI classes proposed in the model are related to spatial variability of shoot biomass, N rates applied and grain yield.

KEYWORDS: precision agriculture, variable nitrogen fertilization, NDVI.

¹ Extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor.

² Eng^o Agrônomo, M.Sc., Pesquisador, Equipe de Agronomia, Instituto Riograndense do Arroz, Cachoeirinha - RS, dsgrahs@gmail.com

³ Eng^o Agrônomo, Ph.D., Professor Adjunto, Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre - RS, bredemeier@ufrgs.br

⁴ Eng^o Agrônomo, Ph.D., Professor Aposentado, Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre -RS, claudiomm@terra.com.br.

⁵ Eng^o Agrônomo, Dr., Porto Alegre - RS, narapoleto@gmail.com

Recebido pelo Conselho Editorial em: 29-4-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 10-3-2009

INTRODUÇÃO

O potencial produtivo de uma cultura é definido como a máxima capacidade de produção de uma planta ou comunidade de plantas, em função da limitação imposta pelo ambiente no qual ela se encontra (EVANS & FISCHER, 1999). Esse potencial pode ser estimado por meio de variáveis agrônômicas de solo ou de planta em qualquer momento do seu ciclo de desenvolvimento (GIRMA et al., 2006). Em cereais de estação fria, dentre as variáveis de planta tradicionalmente utilizadas para representar o potencial produtivo, destacam-se: o padrão de afilhamento, o nitrogênio acumulado no tecido foliar e a biomassa seca acumulada na parte aérea (WOBETO, 1994). Essa última é altamente correlacionada ao rendimento de grãos, quando quantificada nos diferentes estádios de desenvolvimento das plantas (WOBETO, 1994; BREDEMEIER, 1999; POLETTO, 2004).

O potencial produtivo deve ser estimado quando da emissão da sexta folha do colmo principal, pois essa foi definida, em trigo (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2001) e cevada (WAMSER & MUNDSTOCK, 2007), como a época crítica para aplicação de nitrogênio (N) em cobertura. Nesse momento, a planta inicia sua máxima exigência por esse nutriente, uma vez que se define o número máximo de filhos emitidos pela planta (MUNDSTOCK, 1999).

As doses de N recomendadas para trigo e cevada, no Rio Grande do Sul, são baseadas no teor de matéria orgânica do solo, amostrado na pré-semeadura, e no tipo de cultura antecessora (COMISSÃO, 2004). Por essa metodologia, é estabelecida a dose de N que deverá ser aplicada na semeadura e em cobertura (emissão da sexta folha). Porém, na aplicação em cobertura, esse método não é preciso para quantificar a relação entre a necessidade de N e a demanda nutricional da planta (POLETTO, 2004). Para a aplicação de insumos em taxa variável e em tempo real, a análise da matéria orgânica é um método considerado destrutivo e exigente de mão de obra, devido às amostragens a campo (MOLIN, 2001).

Para contornar essa limitação, surgem novas tecnologias, como as baseadas em ferramentas de sensoriamento remoto, sendo que um dos métodos utilizados se baseia na análise da reflectância (MENESES, 2001). Nesse caso, o estado nutricional das plantas em relação ao N pode ser estimado pela modificação da reflectância do dossel (SEMBIRING et al., 2000), basicamente por haver relação inversa entre essa variável e o teor de clorofila (SERRANO et al., 2000). O aumento da concentração de clorofila, em função dos níveis de N, resulta em incremento da área foliar (biomassa) e também da atividade fotossintética (SERRANO et al., 2000). Dessa forma, aplica-se a correlação entre índices espectrais e o acúmulo de biomassa das culturas a fim de prever a condição nutricional ou seu estágio de desenvolvimento (LIU, 2006).

O conhecimento do comportamento espectral da vegetação propiciou o desenvolvimento de sensores remotos adaptados para a adubação nitrogenada em taxa variável. A vantagem na aplicação desses instrumentos é a rapidez na obtenção dos dados a campo, sem destruição da vegetação e em tempo real (DE BOER, 2004).

O “GreenSeeker[®]” é um desses sensores, desenvolvido pela Universidade de Oklahoma (EUA), na década de 1990. Este aparelho utiliza diodos de emissão de radiação nas faixas do vermelho (650 nm) e infravermelho próximo (770 nm). A leitura de reflectância é calculada por microprocessador interno, fornecendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é transmitido a um computador portátil adaptado ao sensor (NTECH INDUSTRIES, 2008). Atualmente, esse sensor vem sendo amplamente utilizado para aplicações de nitrogênio em taxa variável em diversos países, sendo ainda pouco divulgado no Brasil.

O uso do NDVI obtido por meio desse sensor como indicador do estado nutricional da planta, em relação ao nitrogênio, foi apresentado por RAUN et al. (2005), que desenvolveram modelo para predição de doses de N. Os autores basearam-se em 30 ensaios, conduzidos ao longo de seis anos, para o desenvolvimento e a validação do algoritmo de recomendação de doses de N. A base desse algoritmo utiliza a relação do NDVI com o rendimento de grãos na comparação entre zonas de nitrogênio não limitantes com as leituras a serem efetuadas na lavoura. O método utilizado é

eficiente em estimar as doses a serem aplicadas, porém exige sempre a manutenção de uma área-testemunha, o que limitaria o uso direto da tecnologia em qualquer lavoura.

Um método alternativo é a construção de um sistema de adubação nitrogenada baseado em uma variável de planta que apresente igualmente alta correlação com o rendimento de grãos e com o NDVI, como a biomassa seca acumulada na parte aérea. A vantagem desse método é a estabilidade temporal da resposta da biomassa seca na emissão da sexta folha às doses de N aplicadas nesse estádio (POLETTO, 2004), permitindo caracterizar essa resposta por meio de classes de produtividade. Por outro lado, a correlação entre o rendimento de grãos com as doses de N aplicadas na emissão da sexta folha é baixa (MUNDSTOCK, 1999), pois essa resposta é altamente influenciada pelo ambiente, modificando-se entre os anos. Esse fato determina a necessidade de grande número de ensaios em rede a fim de minimizar a dispersão das curvas de resposta.

Dessa forma, o presente trabalho propõe um modelo para estimar classes de potencial produtivo baseado na relação entre leituras de NDVI e a biomassa seca acumulada na parte aérea em cultivares de trigo e de cevada, por ocasião da emissão da sexta folha do colmo principal.

MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos no ano de 2006, sendo um sobre resteva de milho e outro sobre resteva de soja, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Eldorado do Sul - RS). O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico. Cada experimento constou dos seguintes tratamentos: a) duas espécies de cereal de estação fria: trigo e cevada; b) diferentes cultivares dentro de cada espécie: três de trigo (ÔNIX, SAFIRA e FUNDACEP 51) e duas de cevada (MN 743 e BRS 195); c) três densidades de semeadura: a indicada pela pesquisa (250 e 300 sementes aptas por m² para cevada e trigo, respectivamente), 150 sementes aptas por m² acima da indicada e 150 sementes aptas por m² abaixo da indicada; d) cinco níveis de nitrogênio na semeadura: sem N; 20; 40; 60 e 80 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia. O poder germinativo dos grãos foi determinado a fim de estabelecer a quantidade de sementes aptas a serem utilizadas para cada densidade.

Cada experimento foi conduzido em fatorial, no delineamento de blocos casualizados, e o esquema em parcelas subsubsubdivididas, com quatro repetições por tratamento, em que os fatores espécie, cultivar, densidade de semeadura e dose de N foram alocados na parcela principal, subparcela, subsubparcela e subsubsubparcela, respectivamente.

Os tratamentos foram selecionados para simular a diversidade de condições de variabilidade espacial existentes em lavouras comerciais. A escolha das diferentes cultivares teve o objetivo de obter diversidade nas seguintes características: ciclo de desenvolvimento, porte, hábito de crescimento, potencial de afilhamento e suscetibilidade ao acamamento. Foram gerados, portanto, 60 valores por cultivar em cada resteva, quantidade suficiente para permitir a obtenção de valores extremos de mínimo e máximo NDVI e biomassa da parte aérea.

Cada unidade experimental foi composta por uma área de 9,95 m², onde foram semeadas 13 linhas espaçadas em 0,17 m. As avaliações e amostragens em cada unidade foram realizadas por ocasião da emissão da sexta folha do colmo principal e constaram, inicialmente, da leitura da reflectância do dossel, realizada com o sensor GreenSeeker. O aparelho foi posicionado à altura entre 0,8 e 1,0 m acima e paralelamente à superfície do solo (NTECH INDUSTRIES, 2008), e a leitura, realizada em 0,3 m² (0,5 m de deslocamento linear sobre a unidade experimental multiplicado pela largura útil de 0,6 m captada pelo sensor). Após o acionamento do sensor, ocorreu a leitura de um ponto a cada 0,1 segundo, sendo geradas, nessa área, entre 30 e 40 medições de NDVI. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi proposto por ROUSE et al. (1973) para a quantificação do crescimento da vegetação. Esse índice é dado por:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{r}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{r}}) \quad (1)$$

em que,

ρ_{nir} - reflectância no infravermelho próximo (770 nm), e

ρ_{r} - reflectância no vermelho (650 nm).

O NDVI pode variar de -1 a +1. Os valores negativos representam as nuvens, ao redor de zero representam solo nu ou sem vegetação, e os valores maiores que zero representam a vegetação. Quanto maior o valor do NDVI, maior o vigor de crescimento da cultura (LIU, 2006).

Após a medição da reflectância, foi realizada a coleta de plantas na mesma área medida pelo sensor. Nessas amostras, foi avaliada a biomassa seca acumulada na parte aérea, após secagem das plantas em estufa de aeração forçada, a aproximadamente 65 °C, até massa em equilíbrio.

O modelo final de inferência do potencial produtivo baseou-se na estimativa de classes de potencial produtivo (pela relação entre o NDVI e a biomassa seca acumulada por ocasião da sexta folha). Essa relação foi o primeiro passo na elaboração dos resultados obtidos, pois sabe-se que ela é constante ao longo dos anos (LIU, 2006) e também possível de ser caracterizada por índices práticos, que pudessem ser aplicados diretamente por ocasião do uso do sensor GreenSeeker.

Para que existisse futura viabilidade desse modelo, houve a necessidade de que dois fatores limitantes fossem controlados. O primeiro referiu-se à variação que ocorre entre diferentes cultivares e espécies de cereais de estação fria. Havendo diferenças significativas entre essas, a proposta de modelagem deverá ser específica por grupo de cultivares. O segundo referiu-se ao grau de interferência dos elementos da superfície de fundo. A superfície de fundo corresponde ao solo e aos resíduos vegetais a ele associados, sendo coloração, granulometria e umidade do solo e resíduo os principais elementos que constituem essa superfície (SEMBIRING et al., 2000).

Dessa forma, a construção do modelo para a estimativa de classes de potencial produtivo partiu do ajuste de curvas de regressão para a relação entre o NDVI e a biomassa seca da parte aérea para cada cultivar, nas duas restevas (milho e soja), sendo escolhido o modelo que apresentava significância pelo teste F a 5% e maior coeficiente de determinação (R²). Foram desconsiderados, nesses ajustes, valores atípicos (aqueles que apresentavam distância interquartilica superior e inferior a 1,5 vez a média da população amostral). Os procedimentos estatísticos foram realizados com a utilização do programa computacional SAS® System for Windows 9.0. Sobre as curvas de regressão, foram determinados valores críticos que, posteriormente, foram utilizados na geração das classes de potencial produtivo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

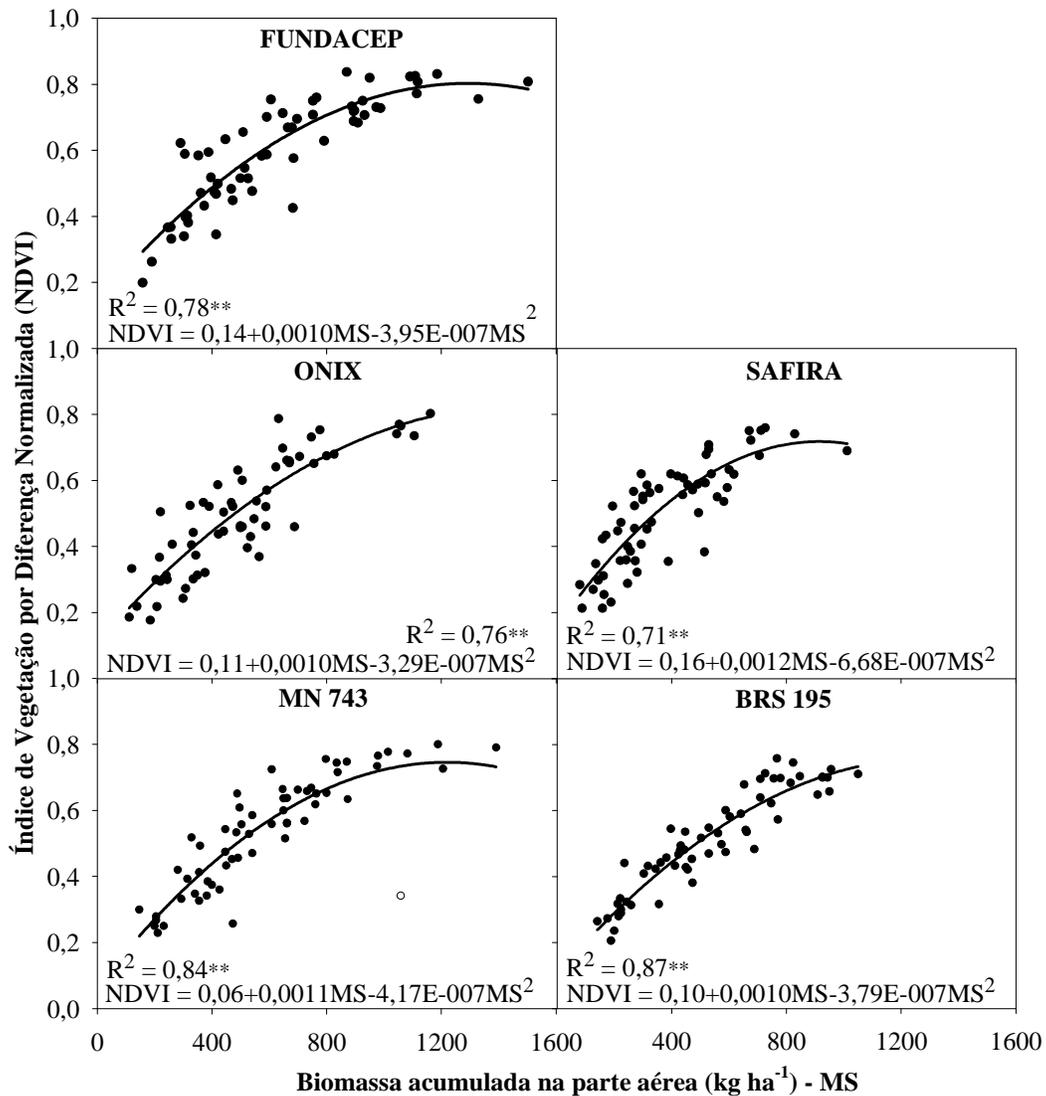
Relação entre a biomassa seca da parte aérea e o NDVI

Na elaboração do modelo, o NDVI foi considerado como variável dependente da biomassa seca da parte aérea, sendo ajustado, separadamente, para a condição de resteva de milho (Figura 1) e de soja (Figura 2) e para as diferentes cultivares. Tal metodologia foi aplicada, pois houve a necessidade de identificar a máxima variabilidade do NDVI em função da máxima variabilidade da biomassa.

Posteriormente, a relação entre a biomassa e o NDVI foi determinada pela adequação de equações de regressão (Figuras 1 e 2) e ajustou-se uma regressão polinomial de segundo grau. Em sensoriamento remoto, o uso de funções exponenciais é comum para expressar a relação da variável indicadora com o NDVI (LIU, 2006). O ajuste exponencial é eficiente em detectar o patamar de máximos valores (ponto de saturação do NDVI) em situações com elevada variabilidade de valores (BRAGA, 1995). Porém, quando o número de pontos amostrados com altos valores é baixo, esse tipo de ajuste tende a não detectar o patamar, levando à linearidade (BRAGA, 1995).

A função quadrática foi aplicada sobre a relação biomassa x NDVI (Figuras 1 e 2) e levou à determinação do ponto de saturação do NDVI. Esse ocorreu no momento em que a curva atingiu

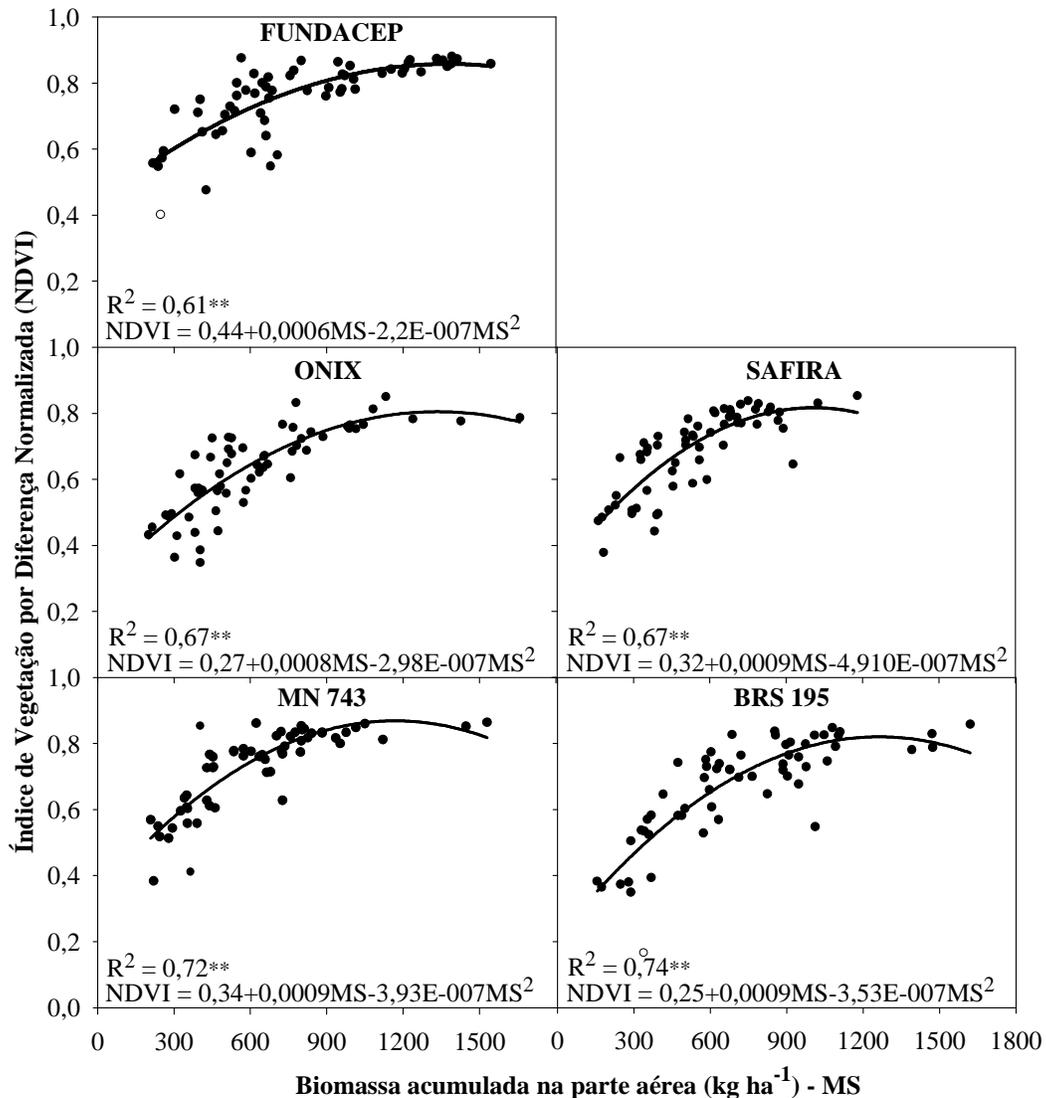
seu ponto de inflexão, sem prejuízos na manutenção da resposta esperada do NDVI em função da biomassa.



** Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

○ Valor atípico não considerado no ajuste do modelo.

FIGURA 1. Relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a biomassa acumulada na parte aérea, por ocasião da emissão da sexta folha, em cinco cultivares de trigo e cevada sobre resteva de milho. **Relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and shoot dry biomass at 6-leaf-stage of five wheat and barley cultivars under corn straw.**



** Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

○ Valor atípico não considerado no ajuste do modelo.

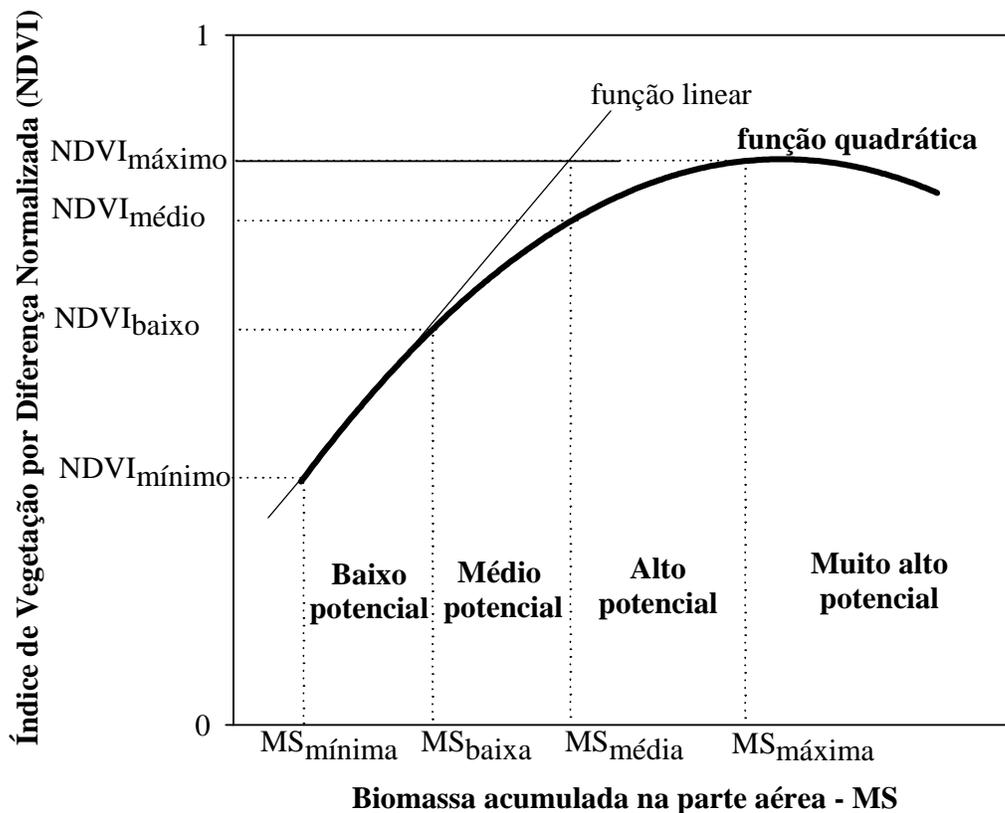
FIGURA 2. Relação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a biomassa acumulada na parte aérea, por ocasião da emissão da sexta folha, em cinco cultivares de trigo e cevada sobre resteva de soja. **Relationship between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and shoot dry biomass at 6-leaf-stage of five wheat and barley cultivars under soybean straw.**

Dessa forma, os coeficientes de determinação, ajustando a função quadrática, foram significativos (variando entre 0,61 e 0,87) para as cultivares de trigo e de cevada, sobre as restevas de milho (Figura 1) e soja (Figura 2). As equações mostraram que o NDVI aumentou com o incremento da biomassa até o valor de saturação do NDVI, representando o máximo acúmulo de biomassa com mínima interferência dos elementos da superfície do solo. O máximo valor de NDVI atingido foi observado na cultivar de cevada MN 743, sobre o resíduo de soja (0,87) (Figura 2), sendo esse valor muito próximo ao considerado por LIU (2006) como máximo valor de saturação do NDVI obtido com o uso de imagens orbitais, que é 0,84. A resposta do NDVI ao incremento da biomassa é comportamento-padrão e, de forma similar, também foi observado por MOGES et al. (2004), que utilizaram o sensor GreenSeeker em trigo, ajustando, porém, regressões exponenciais sobre a relação entre a biomassa acumulada na parte aérea no final do perfilhamento e o NDVI.

Formação das classes de potencial produtivo

As classes de potencial produtivo foram elaboradas pelo método baseado na decomposição das curvas polinomiais ajustadas nas Figuras 1 e 2, determinando-se “valores críticos”. Esses valores correspondem aos pontos de inflexão da curva quadrática nos seus momentos de mudança de sentido e estão identificados no modelo teórico da Figura 3.

Para cada curva nas Figuras 1 e 2, foram definidos quatro valores críticos de NDVI: mínimo, baixo, médio e máximo. Cada um desses valores foi considerado como indicador de um correspondente valor crítico de biomassa seca da parte aérea. Cada conjunto de observações entre dois valores críticos de NDVI e a correspondente biomassa correspondeu a uma classe de potencial produtivo (baixo, médio, alto e muito alto). Os valores críticos e as classes de potencial produtivo representados esquematicamente na Figura 3 são descritos junto à figura.



NDVI_{mínimo}: corresponde ao NDVI referente ao valor mínimo de biomassa obtido, não considerando eventuais valores atípicos. Representa o ponto inicial da classe baixo potencial produtivo.

NDVI_{baixo}: valor máximo de NDVI no qual a função linear perde seu sentido de crescimento, iniciando o sentido quadrático da relação. Representa o valor limite de NDVI entre as classes baixo e médio potencial produtivo.

NDVI_{médio}: valor determinado pela projeção da intersecção entre a reta definida pelo NDVI_{máximo} e a reta da função linear sobre a função quadrática. Representa o valor limite entre as classes médio e alto potencial produtivo.

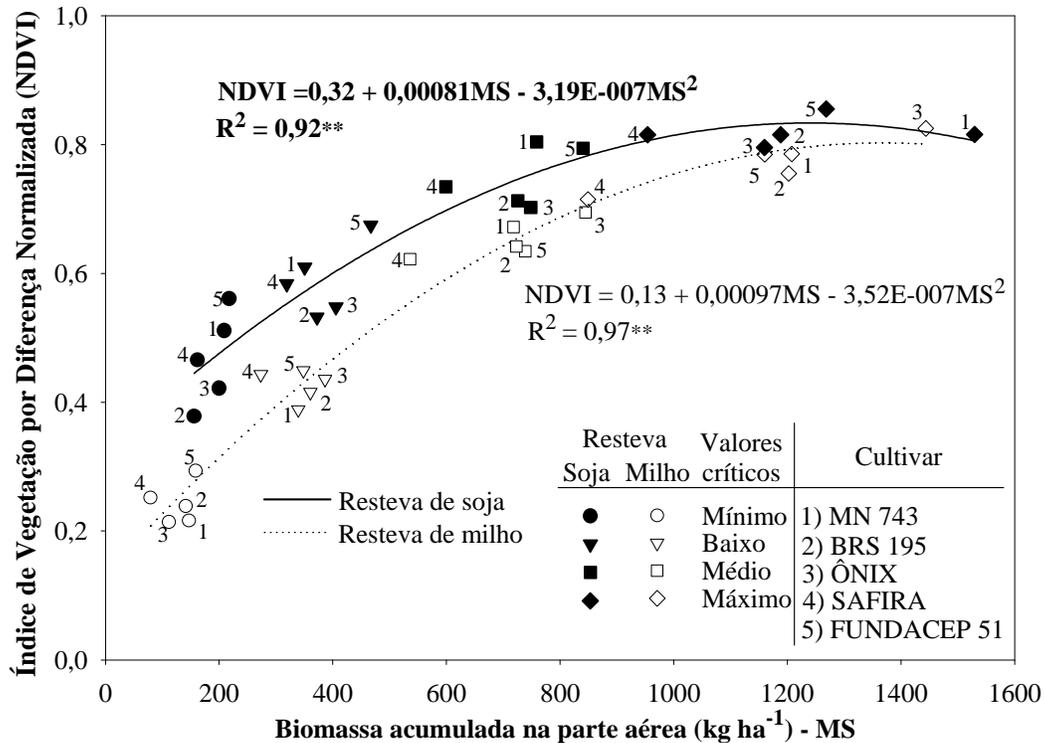
NDVI_{máximo}: primeiro valor de NDVI no qual a regressão inicia seu patamar de valores constantes (inclinação igual a zero). Representa o valor limite entre as classes alto e muito alto potencial produtivo.

FIGURA 3. Modelo teórico desenvolvido para a determinação dos valores críticos de NDVI e de biomassa acumulada na parte aérea e para a estimativa das classes de potencial produtivo. **Theoretical model for determination of NDVI and shoot dry biomass critical values and estimation of yield potential classes.**

Com a identificação dos valores críticos, podem ser gerados indicadores práticos para a avaliação a campo. Assim, a condição nutricional das plantas pode ser avaliada pela sua biomassa seca da parte aérea. De forma similar, ARAÚJO et al. (2005) criaram zonas de manejo com o uso do NDVI. Eles utilizaram a videografia aérea realizada no pré-florescimento de trigo e de soja e visaram a estimar classes de rendimento de grãos.

Efeito das cultivares

O efeito das diferentes cultivares foi testado utilizando-se dos valores críticos de NDVI e de biomassa seca da parte aérea para cada cultivar, em cada classe de potencial produtivo. Eles foram colocados em um único gráfico e sobre esses valores foi ajustada nova regressão quadrática, obtendo-se a Figura 4.



** Modelo de regressão significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

FIGURA 4. Regressão quadrática ajustada sobre os valores críticos do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e biomassa acumulada na parte aérea, por ocasião da emissão da sexta folha, em cinco cultivares de trigo e de cevada sobre resteva de milho e de soja. **Quadratic regression adjusted on NDVI and shoot dry biomass critical values at 6-leaf-stage of five wheat and barley cultivars for corn and soybean straw.**

A Figura mostra que o aumento do NDVI em função do incremento da biomassa ao longo dos valores críticos foi mais importante que as diferenças entre cultivares, tanto sobre resteva de milho como de soja (Figura 4). Isso indica que a diferença de valores de reflectância entre cultivares para a mesma classe de potencial produtivo não é relevante o suficiente para modificar a estimativa de seu potencial produtivo e, por isso, não há a necessidade de realizar ajustes para cada grupo de cultivares e/ou espécies. Esse fato mostra que a utilização do sensor GreenSeeker pode ser feita em diferentes cultivares (utilizando-se da mesma relação NDVI x biomassa), mesmo que as plantas apresentem diferentes características agrônomicas. A mesma conclusão foi obtida por RAUN et al. (2005), que determinaram que o incremento do potencial produtivo (estimado a partir da leitura do

NDVI no momento das aplicações de nitrogênio) era maior que a variabilidade entre os ensaios para a mesma leitura.

O resultado satisfatório obtido neste trabalho foi resultado da metodologia adotada para o isolamento do efeito de cultivares e espécies. Se fosse aplicado o modelo de análise de variância tradicional, provavelmente, haveria interação entre os fatores utilizados no delineamento experimental, levando à grande quantidade de resultados, mas que, provavelmente, dificultaria ou inviabilizaria a obtenção de resultado lógico e de aplicação prática.

Efeito da superfície de fundo

A interferência dos elementos da superfície de fundo sobre as leituras de NDVI do dossel é outro aspecto importante comumente relatado em trabalhos referentes ao uso de sensores remotos (NAGLER, et al., 2000). No uso do sensor GreenSeeker para fins práticos, seria vantajoso unificar, em um modelo comum, os efeitos das restevas de milho e de soja. Porém, para o mesmo valor de biomassa, foi observado que o NDVI em resteva de soja foi superior ao NDVI em resteva de milho, de forma que não se pode ignorar o efeito da superfície de fundo sobre a leitura de NDVI do dossel (Figura 4).

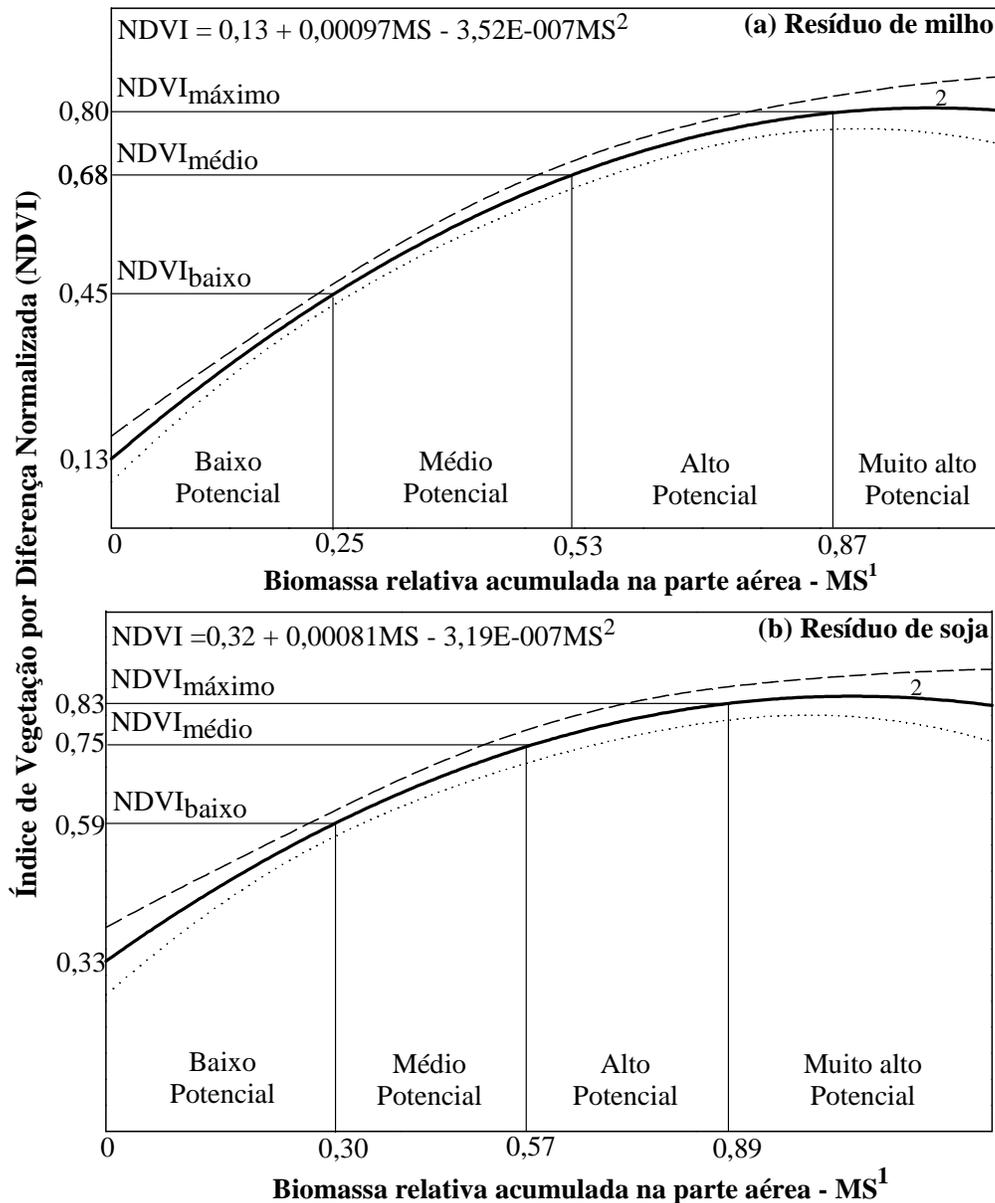
A modificação das curvas espectrais de diferentes tipos de resíduos vegetais sobre o solo (entre eles soja e milho) é dependente da sua constituição vegetal, especialmente o seu conteúdo de celulose (NAGLER et al., 2000). A soja apresenta tecidos celulares com menor dimensão e menor conteúdo de celulose se comparada ao resíduo de milho. Dessa forma, nesse resíduo, ocorre maior transmitância da radiação incidente, principalmente no vermelho, e menor do infravermelho próximo, levando ao aumento do NDVI (NAGLER et al., 2000). Por isso, é importante considerar o modelo de estimativa de classes de potencial produtivo isoladamente para cada resteva. No futuro, será necessário identificar os possíveis efeitos dos elementos da superfície de fundo nessas restevas sobre a modificação das leituras de NDVI do dossel, a fim de gerar modelo de correção para aqueles elementos que determinem as maiores interferências.

Modelos normal, subestimado e superestimado

As classes de potencial produtivo baseadas nos valores dos dados experimentais foram estabelecidas no modelo chamado “normal”, o qual é mostrado na Figura 5. Nela, constam as equações ajustadas da Figura 4 e as classes de potencial produtivo expressas pela média dos valores críticos de NDVI e de biomassa seca da parte aérea (Figura 4), que definem os limites de cada classe de potencial produtivo (Figura 5). Os valores de biomassa, porém, foram transformados em valores relativos. Isso foi feito para que o potencial produtivo seja um valor percentual em relação ao máximo valor de biomassa encontrado no experimento por ocasião da emissão da sexta folha. O máximo valor de biomassa foi 1.529 kg ha⁻¹, na cultivar MN 743, em resteva de soja (Figura 4).

A partir do modelo normal (Figura 5), foram geradas duas curvas, denominadas de modelos “subestimado” e “superestimado” e que corresponderam ao intervalo de confiança a 95% do modelo normal (Figura 5).

A finalidade desses dois modelos foi permitir o uso do sensor GreenSeeker em lavouras que não apresentem condições de variabilidade semelhantes ao empregado neste experimento. Por exemplo, o modelo superestimado pode ser adequado para lavouras amostradas em estágio de desenvolvimento mais adiantado à emissão da sexta folha, quando as áreas de cultivo apresentam menor variabilidade de biomassa. Já o modelo subestimado pode ser adequado para lavouras amostradas antes do momento ideal, quando a variabilidade da biomassa é máxima. Esses princípios foram considerados por GIRMA et al. (2006), que propuseram o uso do sensor GreenSeeker nos momentos de pré e pós-período recomendado para a aplicação de N em cobertura em trigo. Os autores relacionaram valores de NDVI em diferentes estádios de desenvolvimento com o rendimento de grãos, a fim de corrigir o uso do sensor em momentos diferentes do recomendado. Entre o final do afilhamento e o emborrachamento, houve correlação significativa entre essas duas variáveis. A maior correlação foi observada nas avaliações realizadas no alongamento dos entrenós.



¹ Refere-se à divisão de cada observação pela máxima biomassa obtida no experimento.

² A regressão polinomial e o seu intervalo de confiança correspondem aos seguintes modelos:

--- Superestimado — Normal Subestimado

FIGURA 5. Modelo para a estimativa do potencial produtivo de trigo e de cevada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), por ocasião da emissão da sexta folha sobre resteva de milho (a) e de soja (b). **Model for yield potential estimation in wheat and barley at 6-leaf-stage by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for corn (a) and soybean (b) straw.**

Na classe baixo potencial, ocorreram as maiores diferenças entre os valores críticos de NDVI para as restevas de milho e da soja. Os valores de NDVI para os modelos normal, sub e superestimado foram, respectivamente, 0,13; 0,10 e 0,19 sobre resteva de milho e 0,33; 0,27 e 0,39 sobre resteva de soja (Figura 5). A variabilidade de valores verificada nessa classe representa efeito conjunto entre o NDVI sob a mínima presença de plantas e o NDVI da superfície de fundo, sendo que a primeira, provavelmente, poderá ser sobreposta pelo efeito dos elementos da superfície de fundo. A mesma situação foi encontrada por FLOWERS et al. (2003) em trigo, que obtiveram

elevada variabilidade da reflectância do dossel sob condições de baixa presença de plantas em modelo para predição do número de afilhos. Porém, o modelo desenvolvido neste trabalho mostra que, qualquer que seja a causa de baixos valores de NDVI (baixa densidade de plantas ou presença de resíduos vegetais sobre o solo), o potencial produtivo será baixo.

CONCLUSÕES

O modelo proposto foi baseado na relação quadrática entre o NDVI e a produção de biomassa seca da parte aérea, levando à formação das seguintes classes de potencial produtivo: baixo, médio, alto e muito alto. Esse modelo foi aplicado separadamente para as restevras de milho e soja.

Para cada resteva, as classes de potencial produtivo baixo, médio, alto e muito alto foram indicadas, respectivamente, pelos seguintes valores de NDVI: 0,13; 0,45; 0,68 e 0,80, em milho, e 0,33; 0,59; 0,75 e 0,83, em soja.

A ausência de efeito da espécie (trigo ou cevada) e das cultivares dentro dessas permite o uso do sensor sem a necessidade de correções para esses fatores.

Quando o sensor for aplicado em situações fora da época recomendada (emissão da sexta folha do colmo principal), dois modelos de correção poderão ser utilizados. Porém, a validação desses (denominados de “sub” e “superestimado”) deverá ser executada em condições de campo.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J.C.; VETTORAZZI, C.A.; MOLIN, J.P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multiespectral. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.27, n.3, p.437-447, 2005.
- BRAGA, H.J. *Previsão Agrícola: uma nova abordagem - uso de scanner aerotransportável e redes neurais*. 1995. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- BREDEMEIER, C. *Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia*. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Estádios fenológicos do trigo para adubação nitrogenada em cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.2, p.317-323, 2001.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. *Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2004. 400 p.
- DE BOER, J.L. *The management time economics of on-the-go sensing for nitrogen application*. Disponível em: <http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/Frames>. 2004. Acesso em: 03 abr. 2008.
- EVANS, L.T.; FISCHER, R.A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, Madison, v.39, p.1.544-1.551, 1999.
- FLOWERS, M.R.; WEISZ, R.; HEINIGER, B.; TARLETON, A.M. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat. *Agronomy Journal*, Madison, v.95, n.1, p.167-176, 2003.
- GIRMA, K.; MARTIN, K.L.; ANDERSON, R.H.; ARNALL, D.B.; BRIXEY, K.D.; CASILLAS, M.A.; CHUNG, B.; DOBEY, B.C.; KAMENIDOU, S.K.; KARIUKI, S.K.; KATSALIROU, E.E.; MORRIS, J.C.; MOSS, J.Q.; ROHLA, C.T.; SUDBURY, B.J.; TUBANA, B.S.; RAUN, W.R. Mid-season prediction of wheat-grain yield potential using plant, soil, and sensor measurements. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.29, n.5, p.873-897, 2006.
- LIU, W.T.H. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908 p.

MENESES, P.R. Fundamentos da radiometria óptica espectral. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. (Eds.) *Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos espectrais*. Brasília: EMBRAPA Cerrados, 2001. p.15-40.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.27, n.8, p.1.431-1.441, 2004.

MOLIN, J.P. *Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade*. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. 83 p.

MUNDSTOCK, C.M. *Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo*. Porto Alegre: Evangraf, 1999. 228 p.

NAGLER, P.L.; DAUGHTRY, C.S.T.; GOWARD, S.N. Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.71, n.2, p.207-15, 2000.

NTECH INDUSTRIES. *Greenseeker Manuals*. Disponível em: <http://www.ntechindustries.com/greenseeker-manual.html>. Acesso em: 3 abr. 2008.

POLETO, N. *Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada*. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; MARTIN, K.L.; FREEMAN, K.W.; MULLEN, R.W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, G.V. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Monticello, v.36, n.19-20, p.2.759-2.781, 2005.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. *Proceedings...* Washington: NASA, 1973. v.1, p.309-317.

SEMBIRING, H.H.L.; LEES, H.L.; RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; STONE, M.L.; JOHNSON, G.V.; LUKINA, E.V.; COSSEY, D.A.; LARUFFA, J.M.; WOOLFOLK, C.W.; PHILLIPS, S.B.; THOMASON, W.E. Effect of growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v.23, n.1, p.141-149, 2000.

SERRANO, L.; FILELLA, I.; PENUELAS, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, Madison, v.40, n.3, p.723-731, 2000.

WAMSER, A.F.; MUNDSTOCK, C.M. Adubação nitrogenada em estádios fenológicos em cevada, cultivar "MN 698". *Ciência Rural*, Santa Maria, v.37, n.4, p.942-948, 2007.

WOBETO, C. *Padrão de afilhamento, sobrevivência de afilhos e suas relações com o rendimento de grãos em trigo*. 1994. 102 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.