

Estimativa da disponibilidade de forragem do bioma Campos Sulinos a partir de dados radiométricos orbitais: parametrização do submodelo espectral

Forecast the available forage of natural pastures of Campos Sulinos biome using satellite spectral data: parameterization for the spectral submodel

Eliana Lima da Fonseca^I Antônio Roberto Formaggio^{II} Flavio Jorge Ponzoni^{II}

RESUMO

Este trabalho apresenta a parametrização do submodelo espectral do modelo JONG, um modelo agrometeorológico-espectral para a previsão da disponibilidade de forragem das pastagens naturais do bioma Campos Sulinos. A parametrização foi feita testando-se a capacidade de diferentes variáveis espectrais obtidas a partir de imagens do sensor ETM+/Landsat 7 representando a disponibilidade de forragem em diferentes fases do ciclo fenológico da vegetação campestre natural do bioma Campos Sulinos. Verificou-se que as variáveis Wetness e reflectância da banda ETM+7/Landsat 7 representam o status inicial da vegetação de forma eficiente, mas não tiveram sensibilidade suficiente para eliminar os efeitos do tipo de solo na resposta espectral da vegetação.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, Landsat, modelos agrometeorológicos-espectrais.

ABSTRACT

This research presents the parameterization for the spectral submodel of JONG model, an agrometeorological-spectral model to forecast the available forage of natural pastures of Campos Sulinos biome. The capacity of different spectral variables, gotten from images of the sensor ETM+/Landsat 7, to represent the forage availability in different phases of its phenologic cycle was realized. The Wetness variable and reflectance of the band ETM+7/Landsat 7 represent the initial status of vegetation of efficient form was verified, however had no sensitivity enough to eliminate the effect of soil type in the spectral response of the vegetation.

Key words: remote sensing, Landsat, agrometeorological-spectral models.

INTRODUÇÃO

As imagens de satélite fornecem dados quantitativos que permitem o monitoramento e a quantificação da vegetação. Para tanto, a radiância detectada pelos sensores orbitais é convertida em valores numéricos estabelecidos pela resolução radiométrica do sensor. Com base no conhecimento da resposta espectral da vegetação, dos fatores ecofisiológicos que alteram esta resposta e da distribuição dos valores numéricos da imagem, torna-se possível o estabelecimento de relações quantitativas que visam a inferir sobre uma determinada cobertura vegetal, em relação à sua produção, à produtividade e ao status fitossanitário, hídrico ou nutricional.

À medida que ocorram alterações morfo-fisiológicas no dossel, ocorrerão também variações nas frações absorvida, transmitida e refletida da radiação solar incidente (RUSSEL et al., 1989), sendo que a análise e a quantificação dessas variações é o que possibilita a integração dos dados radiométricos orbitais com modelos matemáticos de produção vegetal. Existe uma relação inversamente proporcional entre o aumento da biomassa de folhas verdes ou do índice de área foliar (IAF) e a energia refletida na porção vermelha do espectro eletromagnético (0,6 - 0,7 μ m). O aumento da absorção da energia nesta faixa de comprimento de onda é consequência direta do aumento da quantidade de pigmentos fotossintetizantes (WOOLLEY, 1971; TUCKER, 1973). Variações na adubação das plantas

^IDepartamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500, Instituto Geociências, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: eliana.fonseca@ufrgs.br. Autor para correspondência.

^{II}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

fazem com que ocorram aumentos não só no IAF como também no teor de pigmentos fotossintéticos, aumentando assim tanto a área para interceptar a radiação solar, como também a capacidade de absorver a radiação interceptada (MARSCHNER, 1990). Entre 0,7 e 1,3 μ m (infravermelho próximo), a quantidade de energia refletida aumenta com o aumento do IAF, em função do aumento na quantidade de espaços intercelulares no volume interno das folhas, o que promove o aumento das reflexões e refrações sucessivas da radiação eletromagnética no interior do mesófilo das várias camadas de folhas (WOOLLEY, 1971).

A ocorrência de déficit hídrico nas plantas promove mudanças na resposta espectral de um dossel. A reflectância do visível aumenta, sendo o pico deslocado para a região do vermelho em função do predomínio dos carotenóides e da degradação das clorofilas. No infravermelho próximo, a reflectância diminui devido à degeneração das membranas celulares do mesófilo. A partir do comprimento de onda de 1,3 μ m, a energia refletida aumenta à medida que a vegetação seca, em função do déficit hídrico ou da senescência natural, uma vez que, nesta porção do espectro eletromagnético, a reflectância da vegetação é modulada pelas bandas de absorção da água (KASPEBAUER, 1994).

Estudos empíricos mostram que o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) apresenta correlações significativas com as variáveis biofísicas da vegetação campestre (TUCKER, 1979), principalmente com aquelas que descrevem a fração responsável pela fotossíntese (GAMON et al., 1995), e também com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida ou interceptada pelo dossel (ASRAR et al., 1984; SELLERS, 1985; STEINMETZ et al., 1990). O Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) foi proposto por HUETE (1988) para diminuir a influência da resposta espectral dos solos (*background*) no valor calculado dos índices de vegetação. A transformação *Tasseled Cap* gera componentes com significado físico conhecido para o estudo de áreas agrícolas (CHUVIECO, 1996) a partir do uso de coeficientes pré-definidos para sucessivas rotações de eixos no espaço de atributos (CRIST & CICONE, 1984), ressaltando as características com relação ao brilho, à quantidade de verde e ao grau de umidade presente nos alvos. A técnica de decomposição da resposta das bandas multispectrais a partir de um modelo linear de mistura espectral separa em imagens individuais os diferentes componentes que contribuem para a formação do sinal detectado pelo sensor orbital para a formação de um determinado *pixel* (MATHER, 1999). Para dosséis

podem ser extraídas informações sobre a quantidade de solo e de vegetação dentro de cada *pixel*, bem como a fração sombreada destes alvos, que contribuem para a formação da resposta espectral do dossel (JACKSON et al., 1979; SHIMABUKURO & SMITH, 1991).

Visando ao aumento da exatidão das informações geradas pelos modelos agrometeorológicos de produtividade vegetal, as informações espectrais da vegetação, obtidas em diferentes fases do ciclo fenológico, são integradas a estes modelos, compondo assim os modelos agrometeorológicos-espectrais (KING, 1989). Esses modelos permitem tanto fazer estimativas da previsão do rendimento da vegetação, como também monitorar a vegetação nos diferentes estádios do ciclo fenológico, informando a ocorrência de problemas durante o seu crescimento e desenvolvimento que possam influenciar na sua produtividade (MOTTA et al., 2003), tais como déficit hídrico ou nutricional.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a parametrização do submodelo espectral do modelo JONG (Equação 1), um modelo agrometeorológico-espectral para a previsão da disponibilidade de forragem das pastagens naturais do bioma Campos Sulinos, desenvolvido por FONSECA (2004). O submodelo espectral expressa o status inicial da vegetação ($DF_{t=0}$) com relação à nutrição, à sanidade e ao status hídrico, que é função do impacto das variáveis agrometeorológicas no sistema solo-planta-atmosfera no período anterior à aquisição da imagem pelo sensor orbital. O submodelo agrometeorológico expressa o crescimento da vegetação, que é função da evapotranspiração potencial (ETP), da evapotranspiração real (ETR), do somatório da radiação solar fotossinteticamente ativa incidente (PAR) no período de tempo (t) considerado (em dias) e da eficiência de conversão desta radiação em biomassa aérea (eCA) no período posterior à aquisição da imagem pelo sensor orbital.

$$\Delta DF = DF_{t=0} + \epsilon_{CA} \sum_{t=0}^n PAR_i * \frac{ETR}{ETP} \quad (1)$$

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudos compreende aproximadamente 610.000 hectares, nos municípios de Aceguá, Hulha Negra, Candiota e Bagé, na região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul, coberta pela imagem de órbita/ponto 222/82 dos satélites da série Landsat. As principais atividades de uso da terra são as “pastagens naturais” para a criação extensiva de ovinos e bovinos, as lavouras de arroz e de sorgo (IBGE, 2002). Segundo o levantamento da Produção

Pecuária Municipal (IBGE, 2004), no ano de 2002, os municípios de Aceguá, Bagé, Candiota e Hulha Negra tinham um efetivo bovino de 549.055 animais, correspondendo a aproximadamente 4% do efetivo total de bovinos do Estado do Rio Grande do Sul naquele ano. O relevo da região varia entre plano a suave ondulado. O clima é subtropical (Cfa), a temperatura do ar média anual para o município de Bagé é de 17,9°C, a temperatura do ar média no mês mais frio (junho) é de 12,3°C e no mês mais quente (janeiro) de 24°C. A precipitação pluvial anual média é de 1.460mm (DNMET, 1992), freqüentemente com déficit hídrico climatológico no período do verão.

Em setembro de 2001, foi realizado um trabalho em campo tendo como base a imagem do sensor TM/Landsat coletada na mesma época no ano anterior (setembro de 2000). Durante este trabalho, verificou-se a existência de padrões espectrais distintos para as diferentes formações campestres, através da análise visual da composição colorida das imagens das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat, na qual foi possível diferenciar também as pastagens cultivadas de inverno que ainda vegetavam nesta data, e outras formações vegetais que não são utilizadas como suporte alimentar para a criação de animais, tais como matas ciliares e florestas cultivadas. Pela análise dos padrões de resposta espectral, foram identificadas duas unidades homogêneas do bioma, sendo uma localizada ao sul da cidade de Bagé (denominada neste trabalho de unidade Campo Sul) e outra ao norte (denominada unidade Campo Norte), sendo esta divisão semelhante à apresentada nos levantamentos da vegetação realizados por GIRARDI-DEIRO et al. (1992) e GONÇALVES (1998).

Os trabalhos em campo foram programados para datas simultâneas às datas de aquisição de imagens pelo satélite Landsat 7 sobre a área de estudo. O período de coleta de dados correspondeu ao período de maior crescimento da vegetação campestre natural, que ocorre durante as estações da primavera e verão, totalizando aproximadamente seis meses. Devido à alta incidência de nuvens e de dias chuvosos na região, que impossibilitaram a aquisição de imagens pelo satélite, foram realizados quatro trabalhos em campo para coleta de dados da vegetação referentes às imagens dos dias 2 de outubro de 2002, 19 de novembro de 2002, 6 de janeiro de 2003 e 27 de março de 2003.

Foram delimitadas 14 unidades amostrais posicionadas no interior de poteiros (ou piquetes) que, na época da coleta de dados, estavam sob pastejo. Esses poteiros possuíam área entre 50 e 600 hectares, estando localizados em propriedades particulares presentes no interior da unidade homogênea Campo

Sul. As unidades amostrais foram delimitadas e posicionadas, considerando-se a uniformidade da área com relação ao relevo e à composição florística, tendo, em média, uma área de 1,6 hectares. Todas as unidades amostrais foram posicionadas em campo de forma a deixar uma bordadura homogênea visando a minimizar a interferência da resposta espectral de áreas não amostradas no cálculo das variáveis espectrais. As coordenadas geodésicas referentes aos limites das unidades amostrais foram obtidas com o auxílio de um receptor de GPS, o que permitiu a posterior identificação das mesmas nas imagens de satélite.

As medições de biomassa foram realizadas nos quatro trabalhos em campo de coleta de dados, totalizando assim 56 pontos amostrais (14 unidades amostrais x 4 datas de coleta de dados). Para a coleta das amostras da disponibilidade de forragem, foi utilizado um quadrado de ferro de 0,50m de lado, que delimitava uma área no terreno onde toda a vegetação contida no seu interior era cortada rente ao solo com o auxílio de uma tesoura, conforme as indicações de MACHADO (1999). Em cada unidade amostral, foram coletadas cinco amostras de disponibilidade de forragem, em cada um dos trabalhos em campo. O número de amostras foi definido em função do tempo de execução dos trabalhos em campo pela equipe. Os trabalhos tinham duração de dois dias, a partir da data de passagem do satélite, com o objetivo de amostrar a disponibilidade de forragem do momento da passagem do satélite sobre a área de estudos. As amostras de vegetação coletadas foram secadas em estufas com ar forçado, a uma temperatura de 70°C, por três dias, sendo em seguida pesadas em uma balança de precisão, obtendo-se a quantidade de matéria seca, em gramas por metro quadrado (gMS m^{-2}). A partir dessas amostras, foi calculada a média da biomassa por unidade amostral (em gramas de matéria seca por hectare, gMS.ha^{-1}) e convertida para disponibilidade de forragem média da unidade amostral, em quilogramas de matéria seca por hectare (kgMS ha^{-1}).

Para o cálculo das variáveis espectrais, foram utilizadas imagens do sensor ETM+/Landsat 7 adquiridas nas mesmas datas dos trabalhos em campo. As imagens foram georreferenciadas em um banco de dados geográficos utilizando o aplicativo *Spring*, versão 3.6 (INPE, 2002). Para reduzir os efeitos atmosféricos sobre os valores de reflectância e uniformizar as imagens das diferentes datas, foram realizados os procedimentos de correção atmosférica, através do modelo 6S (VERMOTE et al., 1997), e de retificação radiométrica (HALL et al., 1991), utilizando-se as imagens das quatro datas de coleta de dados.

Para cada unidade amostral foi criado um polígono no banco de dados geográficos, a partir das coordenadas geodésicas coletadas em campo. As variáveis espectrais foram calculadas utilizando-se o módulo de extração das estatísticas de imagens por polígono, disponível no aplicativo *Spring*. O valor da variável correspondeu à média dos valores dos *pixels* do interior do polígono referente a cada unidade amostral. O conjunto de variáveis espectrais testadas para a parametrização do submodelo espectral foram: a) reflectância das bandas individuais do sensor ETM+/Landsat (B3, B4, B5, B7); b) os Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Ajustado para o Solo (SAVI); c) as frações da reflectância obtidas pelo modelo linear de mistura espectral: vegetação (Veg), solo (Sl) e sombra (Sb) (SHIMABUKURO & SMITH, 1991); e d) as variáveis oriundas da transformação *Tasseled Cap*: *Brightness* (B), *Greenness* (G) e *Wetness* (W) (HUANG et al., 2002). As variáveis espectrais testadas para a parametrização do submodelo espectral foram selecionadas em função do significado físico associado a cada uma. Ressalta-se que as bandas individuais foram utilizadas por serem variáveis obtidas sem nenhum processamento, o que facilitaria a obtenção do resultado final, que é a previsão da disponibilidade de forragem, e a interpretação dos resultados, uma vez que as variações na resposta dessas bandas vêm sendo descritas em vários trabalhos de pesquisa desde 1970.

Os dados espectrais obtidos nos meses de novembro de 2002 e janeiro de 2003, totalizando 28 observações (14 unidades amostrais x 2 datas de coleta de dados), foram utilizados para a extração das variáveis espectrais e para a parametrização de um modelo de regressão linear múltiplo visando a equacionar o submodelo espectral ($DF_{10} = b_0 + b_1 VE_{1j} + b_2 VE_{2j} + \dots + b_k VE_{kj}$), em que: DF_{10} = estimativa da disponibilidade de forragem fornecida pelo submodelo espectral; j = número de observações, variando de 1 a 28; VE_k = variáveis espectrais independentes consideradas na parametrização do submodelo, variando de 1 a k ; b_k = coeficientes do modelo de regressão linear múltipla. Este período foi escolhido por representar o estágio de desenvolvimento vegetativo pleno da vegetação, após o cobrimento total do solo pela vegetação ($IAF > 1$) e antes do início do estágio reprodutivo das plantas, evitando assim o alto peso seco das estruturas reprodutivas não fotossintetizantes que influenciam diretamente o peso seco das amostras de disponibilidade de forragem e a grande quantidade de solo exposto que dificulta a análise dos resultados.

Para a seleção das variáveis espectrais e posterior parametrização do submodelo espectral, os

dados foram agrupados em cinco conjuntos (C1: bandas individuais; C2: bandas individuais + índices de vegetação; C3: bandas individuais + variáveis *Tasseled Cap*; C4: bandas individuais + variáveis fração; C5: todo o conjunto de variáveis espectrais) e a equação de regressão foi ajustada através do método Stepwise, no qual, a cada passo, adiciona-se à equação da estimativa da disponibilidade de forragem uma variável do conjunto testado. Para tanto, foi estabelecida uma tolerância de 0,01% para a correlação entre as variáveis que integrariam a equação definida. Como o objetivo do modelo é fazer previsões sobre a disponibilidade de forragem, esta foi tratada como a variável dependente, e as variáveis espectrais formaram o conjunto de variáveis independentes, apesar de a resposta espectral ser dependente da condição em que a vegetação se apresenta no momento da aquisição da imagem pelo sensor orbital.

Para a verificação e seleção das equações obtidas pelo método Stepwise, foram avaliadas as significâncias dos coeficientes calculados (b_k) quanto à capacidade de representar os parâmetros populacionais (β_k), utilizando o teste t de Student, testando a hipótese nula ($H_0: \beta = 0$) para cada um dos coeficientes angulares estimadores dos parâmetros do modelo. Esse passo foi necessário, já que as variáveis independentes selecionadas podem não apresentar validade ($\beta = 0$) da sua contribuição para o cálculo do resultado final, apesar de a equação gerada ser válida (SOUZA, 1998). Também foi feita a análise de resíduos utilizando-se diagramas de dispersão de pontos e testada a igualdade das médias das variáveis reflectância da banda 7 e *Wetness*, separadas conforme o tipo de solo das unidades amostrais a partir do teste de Tukey, utilizando como nível mínimo de significância 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de análises do diagrama de dispersão de pontos construído utilizando-se os valores de disponibilidade de forragem coletados em campo *versus* as diferentes variáveis espectrais, não foi evidenciada sensibilidade suficiente para explicar as variações na disponibilidade de forragem da forma desejada, com o uso de somente uma variável espectral. Nestas mesmas análises, não foi observada a tendência de saturação dos valores das variáveis espectrais em relação à disponibilidade de forragem medida em campo, evidenciando uma relação linear entre estas variáveis, o que permite utilizar um modelo linear múltiplo para relacionar a disponibilidade de forragem com as variáveis espectrais.

O resultado da seleção das variáveis para cada um dos cinco conjuntos testados foi uma equação linear múltipla, as quais estão apresentadas na tabela 1, juntamente com o valor do coeficiente de correlação linear múltiplo (R). Como foi obtida a mesma equação como resposta para mais de um conjunto testado, as equações obtidas foram renomeadas para A (conjuntos 1 e 2), B (conjunto 3 e 5) e C (conjunto 4).

Observou-se um baixo coeficiente de correlação linear múltipla (R) para as equações ajustadas, quando comparado com dados da literatura obtidos sobre o mesmo tipo de formação vegetal para a estimativa da biomassa vegetal a partir de dados radiométricos. GAMON et al. (1995) obtiveram valores de correlação de 0,84 entre a biomassa total e o NDVI para vegetação campestre natural do Estado da Califórnia (EUA), sendo estas medidas feitas em 23 pontos coletados na mesma data, utilizando-se um espectrorradiômetro portátil. PARUELO et al. (1997) obtiveram um coeficiente de determinação de 0,92 utilizando a média de três anos de produção medida em 19 pontos em uma relação exponencial com a integração anual do NDVI (medido pelo sensor AVHRR/NOAA) para gramíneas da região central dos Estados Unidos. PARUELO et al. (2000), estudando a vegetação campestre natural da Argentina, que apresenta muita semelhança com a vegetação do bioma Campos Sulinos (DEREGIBUS, 2000), obtiveram um coeficiente de determinação de 0,74 utilizando 35 pontos para a estimativa, coletados em diferentes datas, sendo que os autores relacionaram, através de um modelo linear, a biomassa aérea acumulada em um período entre 35 e 95 dias e o NDVI (medido pelo sensor TM/Landsat).

O que se observa ao analisar os resultados obtidos por esses autores é que nenhum foi obtido com o mesmo delineamento experimental do presente trabalho, no qual os dados foram coletados em pontos e datas distintas com o objetivo de estimar a disponibilidade de forragem instantânea no momento da passagem do satélite. Assim, a comparação dos resultados deste trabalho com os resultados obtidos pelos autores citados torna-se inconsistente para fins de verificação da exatidão das equações ajustadas.

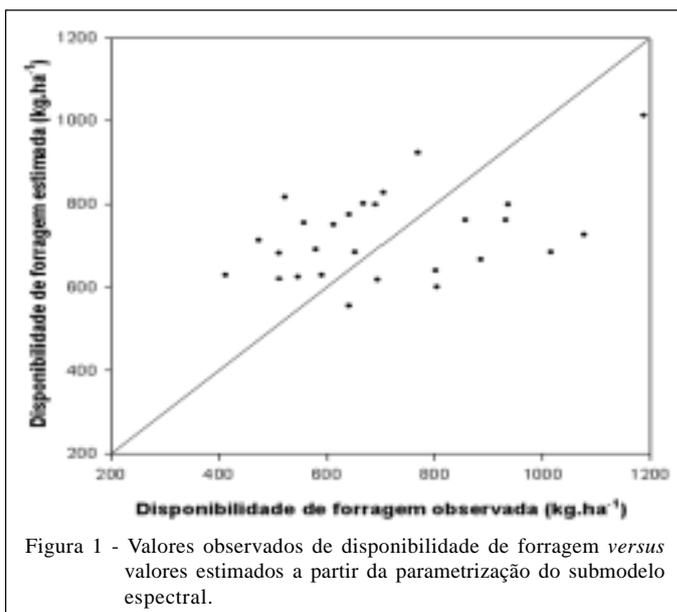
Tabela 1 - Equações para a estimativa da disponibilidade inicial de forragem obtidas através do método Stepwise e o valor do coeficiente de correlação múltiplo (R).

ID	Equação	R
(A)	$DF_{10} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$	0,49
(B)	$DF_{10} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 Wetness$	0,52
(C)	$DF_{10} = 1275,96 - 182,45B7 + 29,96Solo + 32,45B4$	0,55

Verificou-se que a alta variabilidade natural da disponibilidade de forragem gera uma conseqüente variabilidade da resposta espectral da vegetação. Também por este motivo, observou-se um baixo coeficiente de correlação linear múltiplo (R) para as equações ajustadas. Esta variabilidade poderia ser reduzida caso se utilizasse algum procedimento de homogeneização para suavizar os valores de entrada das variáveis espectrais, tais como reamostragem da resolução espacial (degradando o tamanho do *pixel*) ou cálculo da média dos valores espectrais em janelas de 4x4 *pixels* ou maiores. Isso porque o tamanho do *pixel* influencia diretamente a variabilidade espectral da imagem para este tipo de formação vegetal, como demonstrado por PARUELO et al. (2000). Tais procedimentos não foram adotados de forma a evitar uma degradação dos dados de entrada do modelo e a conseqüente perda de informação espectral.

As Equações A e C não apresentaram significância estatística, ao adotar-se um nível mínimo de significância de 10% para teste dos parâmetros β . Na Equação A, observou-se um nível mínimo de significância de 13,58% para o parâmetro β da banda 3. Para o parâmetro β da banda 4, na Equação C, observou-se um nível mínimo de significância para a rejeição da hipótese nula de 24,40%. Com base no nível mínimo de significância estabelecido, somente a Equação B ($DF_{10} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 Wetness$) foi considerada válida, sendo, portanto, considerada como a parametrização do submodelo espectral do modelo JONG. Ambas as variáveis representam, principalmente, a quantidade de água presente nos tecidos vegetais, sendo que os valores da reflectância da banda ETM+7/Landsat 7 também são fortemente influenciados pela quantidade de biomassa de folhas presentes no dossel. Os valores estimados para disponibilidade de forragem através do submodelo espectral *versus* os valores de disponibilidade de forragem medidos em campo estão apresentados na figura 1. Observou-se uma tendência de subestimação dos altos valores de disponibilidade de forragem medidos em campo e um comportamento inverso para os valores mais baixos de disponibilidade de forragem.

Observou-se a independência dos resíduos com relação à data de coleta dos dados a partir da análise da distribuição dos resíduos *versus* o identificador da amostra. A análise dos gráficos dos resíduos *versus* as variáveis independentes não evidenciou tendências de agrupamento de valores na nuvem de pontos, indicando a independência dos resíduos com relação aos valores das variáveis de entrada. Também não foram verificadas tendências de agrupamentos de valores na nuvem



de pontos dos resíduos *versus* os valores ajustados, indicando que a variância da estimativa é constante, não apresentando acréscimo nem decréscimo com o aumento dos valores ajustados.

Pelas análises dos gráficos dos resíduos *versus* o tipo de solo, foi verificada uma tendência de subestimativa dos valores de disponibilidade de forragem sobre os solos da unidade de mapeamento Bagé. Pelo teste de Tukey, não foi confirmada esta subestimativa dos valores das variáveis espectrais sobre o solo da unidade de mapeamento Bagé. Observou-se, nesse mesmo teste, uma diferença significativa nos valores das variáveis espectrais medidas sobre as unidades amostrais posicionadas sobre a unidade de mapeamento de solo Hulha Negra, mas este efeito fica mascarado pelas atividades do manejo das pastagens (principalmente pelo número de animais em pastejo por área de pastagem), sendo esta uma característica de cada propriedade rural, já que essas unidades amostrais encontravam-se no interior de uma mesma propriedade rural. Assim, esta avaliação fica prejudicada no sentido de verificar a existência de uma dependência espacial da disponibilidade de forragem não só com o tipo de solo e composição florística, mas também com relação ao manejo da atividade pastoril.

Para um melhor entendimento dos resultados apresentados neste trabalho, pode ser consultado o documento “Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos” (FONSECA, 2004),

disponibilizado na Internet pela biblioteca do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

CONCLUSÕES

As variáveis *Wetness* e reflectância da banda ETM+7/Landsat 7 selecionadas para parametrizar o submodelo espectral representam o status inicial da vegetação de forma eficiente, mas não tiveram sensibilidade suficiente para eliminar os efeitos do tipo de solo na resposta espectral da vegetação.

A utilização de um maior número de amostras de disponibilidade de forragem a partir da utilização de um maior número de unidades amostrais e um maior número de amostras no interior das unidades amostrais tenderia a minimizar a variância das estimativas feitas pelo submodelo espectral, pela suavização da variância dos dados de entrada, gerando equações com valor do coeficiente de correlação múltiplo mais próximo de 1.

Para estudos semelhantes, a serem realizados com sensores orbitais distintos, torna-se necessário fazer uma nova calibração e parametrização das variáveis espectrais. Uma parametrização robusta do submodelo espectral para um determinado sensor, feita a partir de um maior conjunto de dados coletados em diferentes anos, tornará operacional a metodologia para estimativa da disponibilidade de forragem a partir do modelo agrometeorológico-espectral JONG.

Assim, para trabalhos futuros, recomenda-se aumentar a grade amostral e também medir, além da matéria seca, outras variáveis biofísicas, tais como a matéria fresca, o índice de área foliar, a taxa de crescimento da vegetação e também o consumo animal. O estudo dessas variáveis teria grande validade para parametrizar o modelo agrometeorológico-espectral, bem como para avaliar os dados radiométricos das diferentes datas de coleta de dados.

REFERÊNCIAS

- ASRAR, G et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, v.76, n.2, p.300-306, 1984.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp, 1996. 568p.
- CRIST E.P.; CICONE, R.C. Physically-based transformation of thematic mapper data - the TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.GE-22, n.3, p.256-263, 1984.

- DNMET. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília: DNMET, 1992. 84p.
- DEREGIBUS, V.A. Argentina's humid grazing lands. In: LELAIRE, G. et al. **Grassland ecophysiology and grazing ecology**. Cambridge: CABI, 2000. Cap.20, p.395-405.
- FONSECA, E.L. **Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos**. 2004. 193f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- GAMON, J.A. et al. Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types. **Ecological Applications**, v.5, n.1, p.28-41, 1995.
- GIRARDI-DEIRO, A.M. et al. Campos naturais ocorrentes nos diferentes tipos de solo no Município de Bagé, RS. 2: Fisionomia e composição florística. **Iheringia**, série botânica, v.42, n.1, p.55-79, 1992.
- GONÇALVES, J.O.N. **Campos naturais ocorrentes nos diferentes tipos de solo no Município de Bagé, RS. 1: caracterização, localização e principais componentes da vegetação**. Bagé: Embrapa, 1998. 34p.
- HALL, F.G. et al. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.1, p.11-27, 1991.
- HUANG, C. et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.8, p.1741-1748, 2002.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.25, n.3, p.295-309, 1988.
- IBGE. **Censo Agropecuário Brasileiro 1995-1996**. Capturado em 15 set. 2002. Online. Disponível na Internet: <http://www.ibge.net/ibge/default.php>.
- IBGE. **Pesquisa Pecuária Municipal**. Capturado em 12 jan. 2004. Online. Disponível na Internet: <http://www.sidra.ibge.gov.br>.
- INPE. **SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas**. Capturado em 12 jan. 2002. Online. Disponível na Internet: <http://www.dpi.inpe.br/spring>.
- JACKSON, R.D. et al. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. **Applied Optics**, v.18, n.22, p.3775-3782, 1979.
- KASPEBAUER, M.J. Light and plant development. In: WILKINSON, R.E. (Ed.). **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. Cap.3, p.83-123.
- KING, D. **Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts**. Ispra: Joint Research Centre, 1989. 25p.
- MACHADO, L.A.Z. **Manejo de pastagem nativa**. Guaíba: Agropecuária, 1999. 156p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic, 1990. 674p.
- MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Great Britain: John Wiley & Sons, 1999. 210p.
- MOTTA, J.L.G. et al. Evolução temporal do NDVI/NOAA em áreas cobertas por pixels com proporções variáveis de soja, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.2, p.353-360, 2003.
- PARUELO, J.M. et al. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, v.78, n.3, p.953-958, 1997.
- PARUELO, J.M. et al. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v.3, n.2, p.189-195, 2000.
- RUSSEL, G. et al. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: RUSSEL, G. et al. **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: Cambridge University, 1989. Cap.2, p.21-39.
- SELLERS, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.8, p.1335-1372, 1985.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, n.1, p.16-20, 1991.
- SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não linear**. Brasília: Embrapa, 1998. 505p.
- STEINMETZ, S. et al. Spectral estimates of the absorbed photosynthetically active radiation and light-use efficiency of a winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.10, p.1797-1808, 1990.
- TUCKER, C.J. **The remote estimation of a grassland canopy / its biomass, chlorophyll, leaf water, and underlying soil spectra**. 1973. 212f. Thesis (Master Degree) - Colorado State University.
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, p.127-150, 1979.
- VERMOTE, E.F. et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.3, p.675-686, 1997.
- WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v.47, n.3, p.656-662, 1971.