

Parametrização de modelo agrometeorológico-espectral para estimativa da produção das pastagens do bioma *Campos Sulinos* (RS)

Eliana Lima da Fonseca ¹
Antônio Roberto Formaggio ²
Flávio Jorge Ponzoni ²

¹ Embrapa Tabuleiros Costeiros
Av. Beira Mar, 3250 - 49025-040 - Aracaju - SE, Brasil
eliana@cpatc.embrapa.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{formag, flavio}@dsr.inpe.br

Abstract. This paper shows how models for yield forecast through the integration of spectral information, agrometeorological factors and canopy characteristics can be used to infer about biophysical properties of terrestrial vegetation cover. The objective of this work was established the parameters for a spectral submodel to estimate aerial biomass production of herbaceous vegetation, or forage availability, to *Campos Sulinos* biome.

Palavras-chave: agrometeorological-spectral model, remote sensing, Landsat, modelo agrometeorológico-espectral, sensoriamento remoto.

1. Introdução

O presente trabalho apresenta a parametrização do modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa de produção das pastagens naturais para vegetação campestre natural que compõe a unidade homogênea Campo Sul do bioma *Campos Sulinos*, no Estado do Rio Grande do Sul, proposto por Fonseca (2004).

Os modelos agrometeorológicos-espectrais visam integrar os modelos agrometeorológicos de produtividade vegetal com as informações espectrais da vegetação obtidas a partir de sensores remotos orbitais, com vistas a aumentar a exatidão das informações geradas (King, 1989). Com base nas informações geradas por estes modelos, é possível, além da previsão do rendimento, monitorar a vegetação nos diferentes estádios do ciclo fenológico, informando a ocorrência de possíveis problemas durante o crescimento e desenvolvimento que possam influenciar na sua produtividade (Fontana et al., 2000), sem a necessidade de avaliações constantes em campo, a partir da integração de dados radiométricos orbitais com as variáveis agrometeorológicas que atuam no sistema solo-planta-atmosfera.

Os modelos agrometeorológicos visam representar de forma simplificada as relações existentes entre a resposta fisiológica das plantas e as variáveis ambientais durante os diferentes estádios fenológicos de uma cultura. Estes modelos requerem um conhecimento detalhado sobre as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, as quais são transferidas para sistemas de equações que quantificam as contribuições das variáveis agrometeorológicas na expressão da produtividade final das culturas agrícolas. Nestes modelos, a decisão sobre quais variáveis utilizar está baseada em robustas relações empíricas obtidas através do conhecimento experimental e também consideram os processos fisiológicos da vegetação. Os modelos agrometeorológicos não só explicam o fenômeno estudado, mas

também permitem extrapolações para condições ambientais diferentes daquelas vigentes sobre os dados utilizados para a geração dos modelos (King, 1989).

As imagens de satélite também são utilizadas com o fim de monitorar e quantificar a vegetação de um determinado local, servindo como fontes de dados quantitativos, onde a radiância detectada é convertida em valores numéricos, em um intervalo numérico fornecido pela resolução radiométrica do sensor. Com base no conhecimento da resposta espectral da vegetação, dos fatores ecológicos que alteram esta resposta, bem como da distribuição dos valores numéricos da imagem, tornam-se possíveis estudos quantitativos que visam inferir sobre uma determinada cobertura vegetal, com relação à sua produtividade, ao seu estado fitossanitário e/ou nutricional. À medida que ocorram alterações morfo-fisiológicas no dossel, as frações absorvida, transmitida e refletida da radiação eletromagnética também serão alteradas (Russel et al., 1989). A análise e a quantificação destas variações é o que possibilita o monitoramento da vegetação, bem como a integração dos dados espectrais, obtidos a partir dos sensores remotos, com modelos matemáticos para inferir sobre as propriedades biofísicas de um dossel.

2. Parametrização do submodelo agrometeorológico

A parametrização do submodelo agrometeorológico foi apresentada por Fonseca et al. (2004), sendo que o único parâmetro para o qual a parametrização é necessária é a eficiência de conversão da radiação solar em biomassa aérea (ϵ_{CA}). As demais variáveis do submodelo agrometeorológico são as climáticas coletadas em estações meteorológicas, não necessitando de parametrização.

3. Parametrização do submodelo espectral

Para estimar a disponibilidade de forragem inicial a partir da resposta espectral da vegetação, torna-se necessário selecionar uma variável espectral ou uma combinação destas variáveis que expresse de forma coerente as variações da disponibilidade de forragem. Assim, utilizou-se um modelo de regressão linear múltiplo para parametrizar o submodelo espectral, visando a estimativa da disponibilidade de forragem inicial.

Para coleta dos dados de disponibilidade de forragem inicial foram realizados trabalhos em campo, programados para datas simultâneas às datas de passagem do satélite Landsat 7 sobre a área de estudo. A área de estudo compreende uma área de aproximadamente 610.000 hectares coberta pela imagem de órbita/ponto 222/82, sobre os municípios de Aceguá, Hulha Negra, Candiota e Bagé, na região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul. Nesta ocorrem grandes áreas do bioma *Campos Sulinos*, exploradas economicamente como pastagens para a criação de animais.

O período de coleta de dados correspondeu ao período de maior crescimento da vegetação, que ocorre durante as estações da primavera e verão, totalizando aproximadamente 6 meses. Devido à alta incidência de nuvens e de dias chuvosos na região nesta época do ano, que impossibilitam 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. Para a seleção das variáveis espectrais e a parametrização do modelo linear múltiplo, foram testados os dados espectrais obtidos nos meses de novembro de 2002 e janeiro de 2003, referentes ao estágio de desenvolvimento vegetativo pleno da vegetação, sendo válido, portanto para este estágio de crescimento da vegetação campestre natural, após o cobrimento total do solo pela vegetação.

Para a amostragem de biomassa, foram posicionadas 14 unidades amostrais, no interior de poteiros que estavam sob pastejo, localizados em propriedades particulares. As unidades amostrais foram posicionadas considerando 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 na resposta espectral, minimizando a interferência da resposta espectral de áreas não amostradas no cálculo das variáveis espectrais. As medições de biomassa foram realizadas nestas unidades amostrais nos quatro trabalhos em campo de coleta de dados, totalizando assim 28 pontos amostrais (14 unidades amostrais x 2 datas de coleta de dados).

Em cada unidade amostral foram coletadas 5 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, os quais 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. Para a coleta das amostras, foi utilizado um quadrado de ferro de 0,50 m de lado, que delimitava uma área no terreno onde toda a vegetação era cortada com o auxílio de uma tesoura, rente ao solo. A partir destas amostras foi calculada a média da biomassa por unidade amostral (em gramas de matéria seca por hectare, $gMS.ha^{-1}$) e convertidas 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+ adquiridas nas mesmas datas dos trabalhos em campo realizados para coleta de dados da vegetação. As imagens foram georreferenciadas no banco de dados geográficos e, para eliminar 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 de correção atmosférica 6S, proposto por Vermote et al. (1997)) e de retificação radiométrica (utilizado o modelo proposto por Hall et al. (1991)).

As variáveis espectrais analisadas para a parametrização do submodelo espectral foram as reflectâncias das bandas individuais (B3, B4, B5, B7) do sensor ETM+/Landsat, as variáveis oriundas do modelo linear de mistura espectral (fração vegetação, fração solo, fração sombra) (Shimabukuro e Smith, 1991) e as variáveis oriundas da transformação Tasseled Cap (Brightness, Greenness e Wetness) (Huang et al, 2002).

Os dados foram agrupados em quatro conjuntos (C1: bandas individuais; C2: bandas individuais + variáveis Tasseled Cap; C3: bandas individuais + variáveis fração; C4: todo o conjunto de variáveis espectrais) e a equação de regressão foi ajustada através do método *Stepwise*. O resultado da seleção das variáveis para cada conjunto testado é uma equação linear múltipla, as quais estão apresentadas na **Tabela 1** juntamente com o valor do coeficiente de correlação linear múltiplo (R). Como obteve-se 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), que utilizaram a reflectância das bandas 3, 4 e 7 (B3, B4, B7), o nível de cinza da variável Wetness e da fração Solo.

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

ID	Equação	R
(A)	$DF_{t0} = 1988,45 - 173,75B7 + 191,56B3$	0,49
(B)	$DF_{t0} = 8568,53 - 346,21B7 - 75,85 \text{ Wetness}$	0,52
(C)	$DF_{t0} = 1275,96 - 182,45B7 + 29,96\text{Solo} + 32,45B4$	0,55

Observou-se um baixo coeficiente de correlação linear múltipla (R) para as equações ajustadas quando comparados com dados da literatura obtidos sobre o mesmo tipo de formação vegetal. Mas não foram encontrados na literatura trabalhos com o mesmo delineamento experimental, tanto no que se refere à espacialização das amostras, quanto à variação temporal da coleta de dados, não permitindo comparações entre os resultados.

Para a verificação e seleção das equações obtidas pelo método *Stepwise* foram avaliados a significância dos coeficientes calculados (b_k) em representar os parâmetros populacionais (β_k) utilizando a análise de variância da regressão múltipla (teste F) e o teste *t* de *Student*, utilizando como nível mínimo de significância 10%, já que as equações obtidas pelo método *Stepwise* sempre serão válidas, pois são resolvidas visando a rejeição da hipótese nula ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_k = 0$). As variáveis independentes selecionadas podem não apresentar validade ($\beta = 0$) da sua contribuição para o cálculo do resultado final, apesar da equação gerada ser válida (Neter e Wasserman, 1974). Esta situação foi observada nas Equações A e C, 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 13,6% 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 24,4%. Como os valores para a avaliação da significância do parâmetro β foram maiores que o nível mínimo de significância pré-estabelecido (10%), as Equações A e C foram descartadas. A Equação B é o resultado da parametrização do submodelo espectral e sobre ela foram efetuadas as análises restantes.

Através da análise dos resíduos, observou-se que a variância das estimativas é constante, não apresentando acréscimo nem decréscimo com o aumento dos valores ajustados e a independência dos resíduos com relação aos valores das variáveis de entrada e também com relação à data de coleta dos dados. 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. Para verificar a existência de dependência dos valores das variáveis espectrais com o tipo de solo, foi testada a igualdade das médias das variáveis reflectância das bandas 3 e 7 (B3 e B7) e valores de nível de cinza (NC) da variável Wetness, separadas por tipo de solo das unidades amostrais, a partir do teste de Tukey, sendo o resultado do teste apresentado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Resultado do teste de Tukey para a comparação das médias coletadas sobre diferentes tipos de solos.

Unidade de mapeamento	B7 (%)	Wetness (NC)	B3 (%)
Bagé	14,94 ^A	49,60 ^A	6,91 ^A
Planossolo	15,04 ^A	50,09 ^A	6,90 ^A
Hulha Negra	13,34 ^B	54,83 ^B	5,93 ^B

*Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si para $\alpha = 5\%$.

Pela análise do resultado do teste de Tukey, não foi observada a subestimativa dos valores das variáveis espectrais sobre o solo da unidade de mapeamento Bagé. Observou-se 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 o número de animais em pastejo por área de pastagem), sendo esta uma característica de cada propriedade rural, já que estas 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 mas também

com relação ao manejo da atividade pastoril, mas verifica-se, a partir destas análises, que o tipo de solo influencia diretamente a resposta espectral da vegetação.

4. Avaliação da contribuição das variáveis agrometeorológicas e espectrais no modelo agrometeorológico-espectral parametrizado

Foram integrados o submodelo agrometeorológico e o submodelo espectral parametrizado, obtendo-se o seguinte modelo agrometeorológico-espectral para o cálculo da produção de forragem (ΔPF):

$$\Delta PF = \left[(9581,07 - 325,72B7 - 80,22Wetness) + \varepsilon_{CA} \sum_{i=0}^{16} PAR_i \right] * \frac{ETR}{ETP}$$

com as variáveis evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), radiação solar fotossinteticamente ativa incidente (PAR_i), eficiência de conversão da radiação solar em biomassa aérea (ε_{CA}), reflectância da banda 7 (B7) e nível de cinza da componente Wetness da transformação Tasseled Cap (Wetness).

Foram analisadas as contribuições relativas das variáveis espectrais e meteorológicas na estimativa da disponibilidade de forragem (**Tabela 3**). Para tanto o submodelo agrometeorológico foi transformado em uma variável independente do modelo de regressão linear múltiplo, com coeficiente angular igual à unidade ($b = 1$). Esta transformação permite que sejam calculados os coeficientes de regressão padronizados (b^*), que são utilizados para analisar a contribuição relativa das variáveis independentes do modelo sem considerar a escala de medição destas variáveis (Neter e Wasserman, 1974).

Tabela 3 - Coeficientes de regressão padronizados (b^*) e seus valores relativos para as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral B.

Variáveis	b^*	b^* (%)
B7	3,35	50,1
Wetness	2,65	39,7
Agrometeorológica	0,68	10,2

Pela análise dos valores relativos dos coeficientes padronizados, observa-se que a disponibilidade de forragem inicial, representada pelas variáveis espectrais, possui maior importância no cálculo da estimativa do acúmulo de forragem nos dois modelos agrometeorológicos-espectrais testados. Isto se justifica pelo processo de acúmulo de biomassa, que é realizado pela fotossíntese, a partir da fixação do CO_2 atmosférico, para o qual existe uma dependência direta da quantidade de pigmentos fotossintéticos que farão a absorção da energia solar incidente (Salisbury e Ross, 1992). Assim, observa-se que a exatidão da estimativa da disponibilidade de forragem inicial tem fundamental importância na estimativa do acúmulo de forragem.

Em um modelo agrometeorológico-espectral, as variáveis espectrais têm a função de expressar a condição inicial da vegetação, com relação à nutrição, sanidade e status hídrico das plantas. A condição inicial da vegetação é função dos fatores climáticos que atuaram no sistema solo-planta-atmosfera no período anterior à passagem do satélite e estes mesmos fatores climáticos alteram a resposta espectral dos alvos da superfície que é detectada pelo sensor orbital (Mather, 1999). Com isso, a parametrização da porção espectral do modelo teria resultados diferentes caso fossem utilizadas imagens adquiridas em datas distintas às utilizadas neste trabalho, ou se tivesse ocorrido uma forte chuva antes da data de passagem do satélite, em função dos efeitos atmosféricos não totalmente eliminados pelo processo de correção atmosférica e retificação radiométrica.

5. Avaliação da espacialização do modelo agrometeorológico-espectral parametrizado

Para a melhor visualização da aplicabilidade do modelo agrometeorológico-espectral, foram gerados mapas-síntese de disponibilidade de forragem, a partir da espacialização dos valores estimados. Foram utilizados os valores de radiometria das imagens ETM+/Landsat adquiridas em 19 de novembro de 2002 e 6 de janeiro de 2003 para o cálculo das variáveis espectrais gerando mapas de estimativa espacializada da disponibilidade de forragem acumulada em um período de 16 dias, com uma resolução espacial de 30 metros, apresentados na **Figura 1**. Utilizou-se para a espacialização dos dados somente uma parte da área de estudos sobre a qual encontram-se as unidades amostrais, com a finalidade de analisar os resultados estimados pelos modelos.

Ao observar os mapas de disponibilidade de forragem gerados a partir do modelo agrometeorológico-espectral parametrizado, observa-se uma tendência das estimativas da disponibilidade de forragem ficarem próximas dos valores médios medidos em campo. Nestes mapas observa-se também a expressão da diminuição da disponibilidade de forragem em decorrência do déficit hídrico que existiu na área de estudos durante o período de 6 de janeiro a 21 de janeiro de 2003, fazendo com que as estimativas para este período sejam menores que as estimativas feitas para o período de 19 de novembro a 5 de dezembro de 2002, onde não existiu déficit hídrico.

Também foi observada uma homogeneização dos valores de disponibilidade de forragem após o fatiamento dos valores estimados, suavizando a grande variabilidade espacial verificada nos valores espectrais das unidades amostrais e dos valores de disponibilidade de forragem. O tamanho do pixel influencia diretamente na variabilidade espectral da imagem, neste tipo de formação vegetal, como demonstrado por Paruelo et al. (2000) que observaram uma alta variabilidade dos valores do NDVI medidos sobre os campos do Rio da Prata, na Argentina, em janelas de pixels de diferentes tamanhos, sendo que a variabilidade espectral diminuía à medida que aumentava o tamanho da janela. No presente trabalho optou-se por fatiar o mapa final e não os valores de entrada das variáveis espectrais, o que tem por vantagem fatiar o resultado de uma operação feita sem a degradação dos dados de entrada do modelo agrometeorológico-espectral.

6. Conclusões e considerações finais

O modelo agrometeorológico-espectral parametrizado foi sensível para expressar as variações espaciais da disponibilidade de forragem e também a diminuição da produção vegetal em função da ocorrência de déficit hídrico durante o período de crescimento vegetativo das plantas. As variáveis espectrais utilizadas para a parametrização do submodelo espectral foram a reflectância espectral da banda 7 e a componente Wetness da transformação Tasseled Cap. Estas variáveis foram eficientes em representar a condição inicial da vegetação nas condições estudadas, mas não foram eficientes em eliminar os efeitos do tipo de solo na resposta espectral da vegetação.

Salienta-se que os resultados da parametrização do submodelo espectral seriam diferentes caso os dados espectrais tivessem sido coletados por outro sensor, ou se as condições climáticas que antecederem a data de passagem do satélite fossem muito distintas das observadas. 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 conjunto de dados maior coletados em diferentes anos tornará operacional a metodologia para estimativa da disponibilidade de forragem a partir do modelo agrometeorológico-espectral proposto.

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

Referências

- Fonseca, E.L. **Desenvolvimento de modelo da disponibilidade de fitomassa aérea para formações campestres naturais a partir de dados espectrais orbitais e agrometeorológicos**. 2004. 173 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.
- Fonseca, E.L.; Silveira, V.C.P.; Salomoni, E. Cálculo da eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa incidente em biomassa aérea da vegetação campestre natural do bioma Campos Sulinos. [CDROM]. In: Simposio Internacional de Pastagens. 2., **Anais...** Curitiba, 2004.
- Fontana, D.C.; Weber, E.; Ducati, J.R.; Figueiredo, D.C.; Bergamaschi, H.; Berlato, M.A. Monitoramento e previsão de safras no Brasil. [CDROM]. In: Simposio Latino Americano de Percepción Remota. 9., **Anais ...** Puerto Iguazú, 2000.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.1, p.11-27, 1991.
- Huang, C.; Wylie, B.; Yang, L.; Homer, C.; Zylstra, G. 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.
- King, D. **Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts**. Ispra: Joint Research Centre, 1989. 25p.
- Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 2 ed., Great Britain: John Wiley & Sons, 1999. 210p.
- Neter, J.; Wasserman, W. **Applied Linear Statistical Models: regression, analysis of variance and experimental designs**. Illinois: Richard D.Irwin, Inc., 1974. 842p.
- Paruelo, J.M.; Oesterheld, M.; Di-Bella, C.M.; Arzadum, M.; Lafontaine, J; Cahuap, M.; Rebella, C.M. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. **Applied Vegetation Science**, v.3, n.2, p.189-195, 2000.
- Russel, G.; Jarvis, P.G; Monteith, J.L. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Russel, G.; Marshall, B.; Jarvis, P.G. **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. p.21-39.
- Salisbury, F.B.; Ross, C.W. **Plant physiology**. [s.l.], Wadsworth Pub., 1992. 682p.
- Shimabukuro, Y. E. and 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, p.16-20, 1991.
- Vermote, E.F.; Tanré, D.; Deuzé, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J Second simulation of de satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.3, p.675-686, 1997.

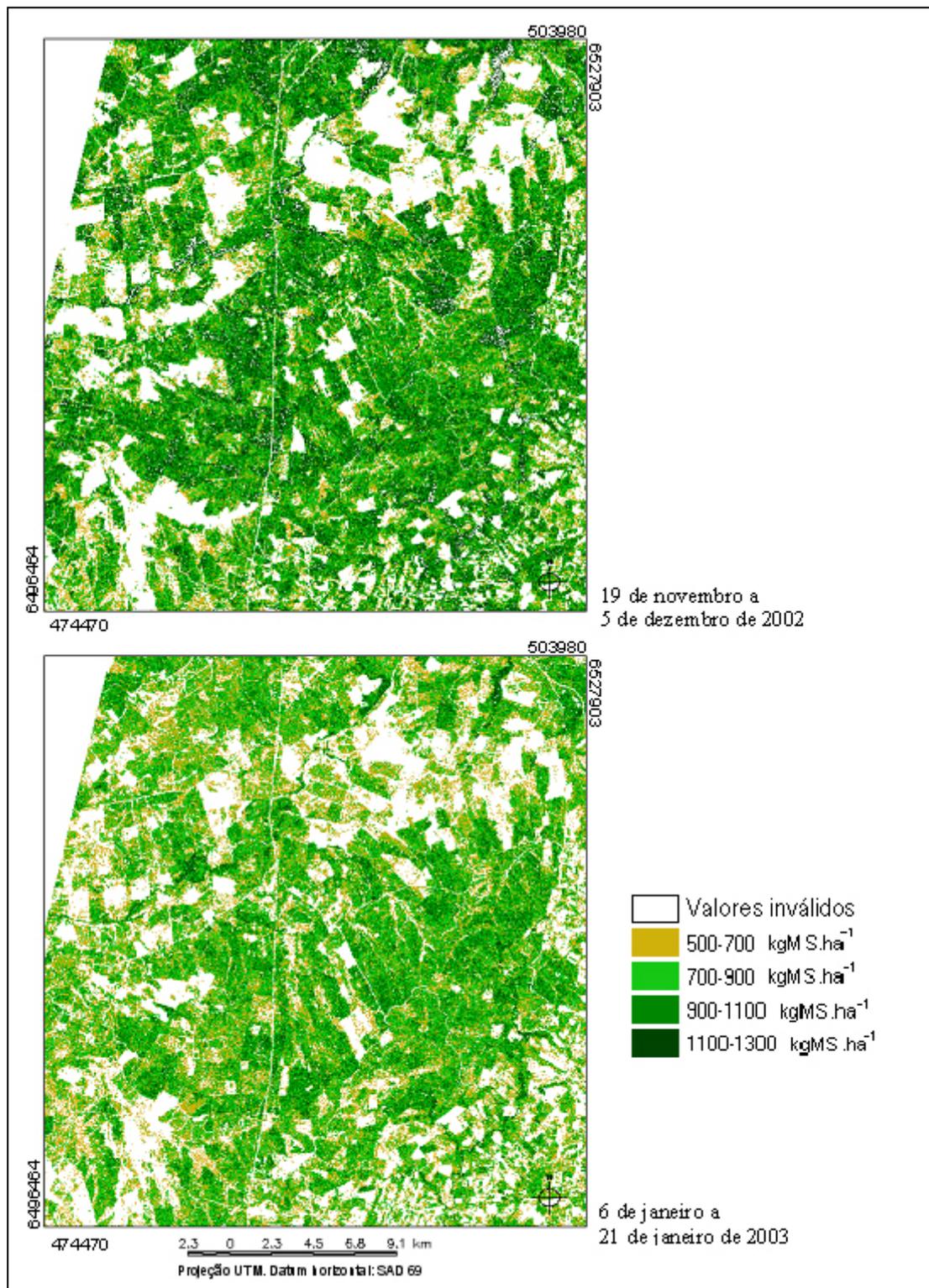


Figura 1 - Espacialização da estimativa da disponibilidade de forragem feita a partir do modelo agrometeorológico-espectral parametrizado.