

QUANTIFICAÇÃO DE FITOMASSA FLORESTAL AÉREA DE CERRADO E CERRADÃO A TRAVÉS DE IMAGENS ORBITAIS SAR

GERARDO KUNTSCNIK
MARISA DANTAS BITENCOURT

LEPaC - Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo
Rua do Matão, Travessa 14, 321 - São Paulo - SP, Brasil
{gerardok, tencourt}@ib.usp.br

Abstract. This paper shows the methodology used to quantify aboveground forest biomass in an area covered by different physiognomies of *cerrado* (Brazilian savanna). The study area comprises a gradient of biomass from grass, without forest species, to dense *cerradão* (cerrado woodland). Remote sensing data was supplied by a JERS-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) image. Backscattering values from that image were confronted against biomass values obtained in field works. As a result a fitting curve relating backscattering and phytomass values was obtained. The importance of this study is that it constitutes a low cost methodology for phytomass quantification through SAR remote sensing.

Keywords: cerrado, biomass, SAR.

1. Introdução

O cerrado é o bioma brasileiro que vêm sofrendo maior grau de devastação. Assim, o Estado de São Paulo que antigamente tinha 14% do seu território coberto por diferentes fisionomias deste bioma, atualmente conta com apenas 1,7% da área original (São Paulo Secretaria do Meio Ambiente, 1997). A quantificação da biomassa da vegetação que constitui o complexo cerrado tem recebido pouca atenção (Castro, 1998) a despeito da importância que ela tem no armazenamento de carbono. O sensoriamento remoto tem sido frequentemente utilizado para quantificação de biomassa vegetal. No entanto, a ênfase geralmente é feita nas ferramentas do sensoriamento remoto óptico, principalmente através de índices de vegetação (Jackson *et al.* 1991). Estes índices apresentam bom desempenho quando os órgãos preponderantes da vegetação são fotossintéticos, como no caso de plantas herbáceas (Huete *et al.* 1997). Mas quando a maior parte da fitomassa é constituída por tecidos e órgãos não fotossintéticos, o sensoriamento remoto por radar tem apresentado resultados mais promissores (Luckman *et al.*, 1998).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é procurar uma relação entre a biomassa aérea florestal de cerrado *stricto sensu* e cerradão e o sinal de retroespalhamento registrado em imagens de radar de abertura sintética na banda L. Desta forma será possível estimar e espacializar os valores que assume este parâmetro biofísico através de imagens JERS-1, em forma rápida e econômica.

3. Materiais e métodos

O trabalho foi desenvolvido em duas fazendas do Município de Campos Novos Paulista, no Oeste do Estado de São Paulo. A área de estudo encontra-se dentro do retângulo definido pelas coordenadas 587.500 E, 607.500 E e 7.500.000 N, 7.515.000 N no fuso 22 do sistema de projeção UTM. A área originariamente encontrava-se coberta por diferentes fisionomias do bioma cerrado, e incluía algumas áreas de ecótono deste bioma com floresta estacional semi-decidual. Atualmente a maior parte da vegetação natural encontra-se substituída principalmente por pastagens e, em menor grau, por culturas agrícolas. Alguns remanescentes

de cerrado, no entanto, permanecem na região, tendo sido incluídos no Inventário florestal do Estado de São Paulo (Kronka *et al.* 1993).

No trabalho foi utilizada uma imagem adquirida pelo satélite japonês JERS-1 no dia 20 de dezembro de 1995 na órbita ponto 389/-338. Este satélite operava na região espectral das microondas, especificamente na banda L, cujo comprimento de onda é de ~23 cm.

Também foi utilizada uma imagem gerada pelo sensor ETM a bordo do satélite Landsat7, correspondente à órbita ponto 221/76 do sistema de referência (WRS). A data de aquisição da imagem é 26 de junho de 2002. Esta imagem foi georreferenciada a través de pontos de controle obtidos no campo com um receptor GPS e da carta topográfica Campos Novos Paulista SF-22-Z-A-V-2 escala 1:50 000 publicada pelo IBGE.

Foi feito um levantamento fisionômico preliminar da vegetação de área de estudo a través de imagens índice de vegetação diferença normalizada (IVDN). Este levantamento serviu de base para a realização de um levantamento florístico expeditivo (Durigan, 1999), o qual possibilitou refinar as informações que se tinha sobre a vegetação da área. Com base nestes dados foi feito um zoneamento fisionômico estrutural da vegetação a partir do qual foram escolhidos os pontos de coleta de dados de fitomassa. O método usado para a quantificação deste parâmetro biofísico foi o de quadrantes centrados (Mueller-Dombois e Elleberg, 1974).

Foram definidas 10 áreas sendo que em cada uma delas procedeu-se à medição de 20 quadrantes, com quatro árvores cada um. As determinações realizadas no campo foram diâmetro à altura do peito (DAP) e altura (h).

O cálculo de fitomassa aérea foi feito a través da aplicação de equações alométricas desenvolvidas por Delitti *et al.* (2002). Estas equações foram estabelecidas para vegetação de cerrado *stricto sensu* e cerrado no Estado de São Paulo.

Outra área, correspondente a pasto sem árvores, também foi considerada aos efeitos de dispor de maior número de pontos para relacioná-los com os dados de retroespalhamento das imagens de radar. Nesta área não foram feitas determinações de fitomassa florestal aérea devido à ausência de indivíduos arbóreos. As coordenadas geográficas de cada área amostrada foram coletadas a través de GPS. Estes pontos serviram para definir as regiões de amostragem do sinal de retroespalhamento registrado nas imagens de radar georreferenciadas.

A imagem SAR foi lida, recortada e georreferenciada no programa ENVI 3.5. Com o intuito de diminuir o efeito do ruído *speckle* a imagem foi submetida a uma filtragem com o filtro de Frost, de 3x3. A seguir, na imagem, foram delimitadas áreas representativas em torno de cada ponto correspondente a cada um das áreas amostradas no campo (**Figura 1**). Os valores de retroespalhamento considerados foram os valores médios para cada área.

Foi procurada uma equação que representara a relação entre os valores de biomassa, expressos em toneladas/hectare, e de retroespalhamento (σ), tanto em números digitais (nd) quanto em decibéis (dB). Para este último passo, foi necessário transformar os valores de nd para dB, o qual foi feito a través da **Equação 1** (Rosenqvist, 1996):

$$\sigma = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum (DN^2)}{n} \right) + CF \quad \text{Equação 1}$$

onde:

DN: Número digital do pixel

CF: Fator de calibração -85,34 (Shimada, 2001)

N: Número de pixels considerados

O sistema de geração de imagens de radar utilizado pela Agencia Espacial Japonesa, NASDA, tem como característica que os valores de resposta dos alvos registrados nas em unidades de número digital não são constantes ao longo do tempo. Isto é, quando o mesmo alvo é imageado em diferentes épocas pelo mesmo sistema sensor, os valores registrados na imagem não permanecem constantes. A transformação dos valores da imagem de número digital a decibéis permite eliminar esta variação e obter valores comparáveis entre diferentes períodos de tempo. Esta conversão de unidades implica numa transformação logarítmica segundo a **Equação 1**.

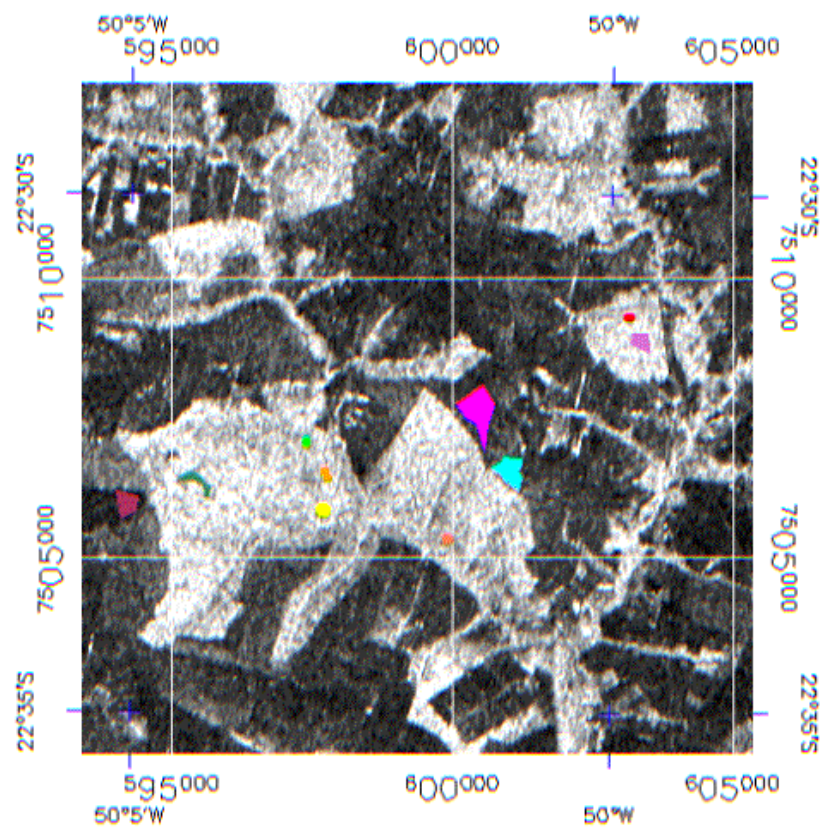


Figura 1: Imagem JERS-1 da área de estudo mostrando as regiões onde foram coletadas amostras dos valores de retroespalhamento e de biomassa no campo.

4. Resultados

A metodologia utilizada para o levantamento das variáveis biofísicas, DAP e altura, a escolha da estratégia de amostragem a través do método de quadrantes centrados e o cálculo posterior de biomassa florestal aérea a través de equações alométricas desenvolvidas para condições de vegetação similares permitiu caracterizar um amplo espectro da vegetação. Assim foram computados valores de biomassa em um range desde 3,32 ton/ha. até 120,35 ton/ha.

O primeiro caso, corresponde a uma área antigamente ocupada por cerradão, na qual a vegetação florestal foi quase que totalmente retirada para a implantação de pasto. Nesta área, localizada ao NO do ponto com coordenadas UTM 22S 0600434 e 7506980, permanecem alguns indivíduos de grande porte. A média dos valores de DAP das árvores nesta área de coleta é 28,88 cm. e a biomassa aérea média dos indivíduos é de 243,3 kg. Estas árvores, no

entanto, encontram-se muito esparsas. Isto fica evidenciado pela distância média entre as árvores que é de 38,29 m., o que provoca a ocorrência dos valores baixos mencionados de biomassa por unidade de área. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -17,8 dB.

A área com segundo menor valor de biomassa por hectare corresponde a uma região vizinha da primeira, localizada ao S do ponto descrito acima. Esta era originalmente uma área com cobertura similar, mas nela a vegetação florestal foi também parcialmente retirada. No entanto, foram deixados mais indivíduos arbóreos, o que resulta em maiores valores de biomassa por unidade de área. Assim, o valor médio deste parâmetro para a segunda área de estudo é de 4,89 ton/ha. O DAP médio, um pouco menor que na primeira área, é de 24,7 cm, enquanto que a biomassa média por indivíduo 173,2 kg também é menor. Este menor tamanho das árvores, junto com maiores valores de biomassa por unidade de área, provocam uma maior proximidade entre os indivíduos. Assim a distancia média entre eles é de 18,82 m. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de 14,2 dB.

A área com terceiro menor valor de fitomassa aérea por unidade de superfície está localizada em volta do ponto UTM 22S 0595500 e 7506500. Esta se encontra coberta por cerrado *stricto sensu* mais aberto. As árvores aqui apresentam menores dimensões, porém são mais numerosos que nos casos anteriores. O DAP médio é de 18,36 cm. e a biomassa é de 6,6 ton/ha. A distância média entre árvores é de 11,2 metros e a peso médio por indivíduo é de 83,1 kg. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de 13,8 dB.

A próxima área, em ordem crescente de valores de biomassa florestal aérea por unidade de área, está localizada em torno do ponto UTM 22S 0599802 e 7505514. Esta corresponde a uma área de ecótono entre cerradão e floresta estacional semidecidual, de acordo com o levantamento florístico realizado (Durigan, 1999). Este tipo de vegetação permitiria esperar valores de fitomassa significativamente maiores aos que se encontram nas áreas cobertas pelo cerrado. No entanto esta situação não foi a encontrada nesta área. Isto se deve, provavelmente, a que a vegetação arbórea foi totalmente retirada há aproximadamente 20 anos e o que encontramos atualmente é uma cobertura florestal em processo de regeneração, cuja biomassa é de 32,24 ton/ha. Muitas árvores apresentam rebrote desde a parte inferior do caule, que foi a porção deixada no terreno após a retirada da porção com valor comercial. Das 80 árvores amostradas nesta área, 17 apresentaram este fenômeno de rebrote múltiplo axilar. Esta área encontra-se comunicada com outras destinadas a pastagem, pelo que o gado invade continuamente, dificultando assim a regeneração. A média de DAP nesta área é de 11,4 cm, enquanto o peso médio das árvores medidas é de 32,25 kg e a distância média entre os indivíduos é de 3,3 metros. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -13,37 dB.

A próxima área amostrada, seguindo a ordem crescente de fitomassa arbórea aérea, estende-se em volta do ponto localizado nas coordenadas UTM 22S 0595600 e 7506100. O solo encontra-se coberto por cerradão, com acumulação de serrapilheira no solo. Este é um indicio de que o fogo não penetra nesta área freqüentemente. As árvores encontram-se a uma distância média similar às árvores da última área descrita, isto é, 3,3 metros. O DAP médio é de 14,16 cm. enquanto que a biomassa média por indivíduo é de 61,3 kg e a biomassa por unidade de área é de 55,80 ton/ha. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -13,19 dB.

Ainda seguindo o mesmo critério para a apresentação das áreas a próxima fica localizada em torno das coordenadas UTM 22S 0603814 e 7508365. Esta corresponde a uma área de cerradão bem conservado. A área foi submetida a corte raso há uns 30 anos, mas desde então vem sendo protegida com alambrado que impede a entrada de gado, pelo que o avanço da regeneração é notório. Foram diferenciadas duas sub-áreas em torno deste ponto. Uma mais próxima da borda, onde a quantidade de biomassa é menor, atingindo o valor médio de 60,53 toneladas por hectare, com indivíduos separados 3,2 metros um de outro, DAP médio de 13,7

cm e peso médio de 61,5 kg. por árvore. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -11,64 dB. Na segunda sub área próxima a este ponto, a qual encontra-se mais afastada do limite e, devido a isto, menos influenciado pelo efeito de borda, o valor médio de biomassa encontrado é de 90,08 ton/ha. Os indivíduos incluídos na amostragem apresentam um peso médio de 44,9 kg, DAP médio de 11,3 cm. e estão distanciados 2,2 metros em media uns dos outros. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -10,34 dB.

Poucas informações estão disponíveis do histórico de uso do solo nas fazendas estudadas. Na carta topográfica Campos Novos Paulista SF-22-Z-A-V-2, escala 1:50 000 publicada em 1975 pelo IBGE, a área toda da Fazenda Alvorada de Bragança, que inclui todos os pontos amostrados menos os dois mencionados por último, aparece descrita como coberta por pastagem. A única exceção está constituída por uma faixa localizada ao longo de uma drenagem que corre aproximadamente de Norte a Sul. Esta área está descrita na legenda da carta como mata, cerrado, macega, floresta ou caatinga. Muito embora esta descrição seja excessivamente geral, pode se inferir que a vegetação florestal mais antiga da área esteja localizada precisamente dentro dessa faixa. Também parece lógico assumir que a regeneração do cerrado *stricto sensu* e cerradão nas áreas vizinhas tenha sido feita, pelo menos em parte, a partir de propágulos provenientes desta faixa. Por este motivo, três áreas de amostragem foram definidas na região. A primeira está localizada em torno do ponto definido pelas coordenadas UTM 22S 0597750 e 7505555, está em uma encosta declivosa, à beira da drenagem mencionada. Se encontra coberta por vegetação que conforma uma fisionomia do tipo cerradão, com algumas árvores emergentes. Há evidências de fogo no passado na cortiça de alguns indivíduos. O ambiente é úmido e existem touceiras de bambu. Esta área apresenta o valor médio de biomassa de 69,89 toneladas por hectare, com árvores de 80 kg, com DAP de 16,42 cm, separados por uma distância de 3,55 metros em média. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -11,16 dB. Uma segunda área dentro desta faixa que contorna a drenagem está localizada em torno do ponto com coordenadas UTM 22S 0597465 e 7506950. O valor médio de biomassa determinado nesta área é de 108,27 ton/ha. O DAP médio é de 17,2 cm., as árvores se distribuem em torno do valor de 106 kg de peso e estão distanciados por 3,13 m. em média. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -10,24 dB. A terceira, e última, área amostrada dentro da faixa de vegetação à beira da drenagem, é a que apresenta maior quantidade de biomassa dentre todas as áreas amostradas neste trabalho, 120,35 toneladas por hectare. Ela está localizada em torno do ponto com coordenadas UTM 22S 0597753 e 7506443. As árvores nesta área pesam em media 80 kg, têm DAP oscilando em torno de uma média de 16,42 cm e estão separados por uma distância média de 3,55 metros. O valor de retroespalhamento médio nesta área é de -9,86 dB. É possível que o fato de estar localizada numa área próxima a um curso d'água, e devido a isso não submetida a déficit hídrico em nenhum período do ano, seja responsável pelo acúmulo de biomassa. Outro elemento que deve ser levado em consideração é a declividade que possibilita uma maior exposição à radiação solar, facilitando assim altas taxas de fotossíntese. Estes fatores devem ser considerados junto ao fato de provavelmente ser esta, à luz dos escassos dados históricos existentes, a área com vegetação nativa mais antiga da região estudada.

A **Figura 2** mostra a curva que relaciona os valores de biomassa aérea florestal com os valores médios de retroespalhamento em número digital para as áreas delimitadas na imagem JERS-1.

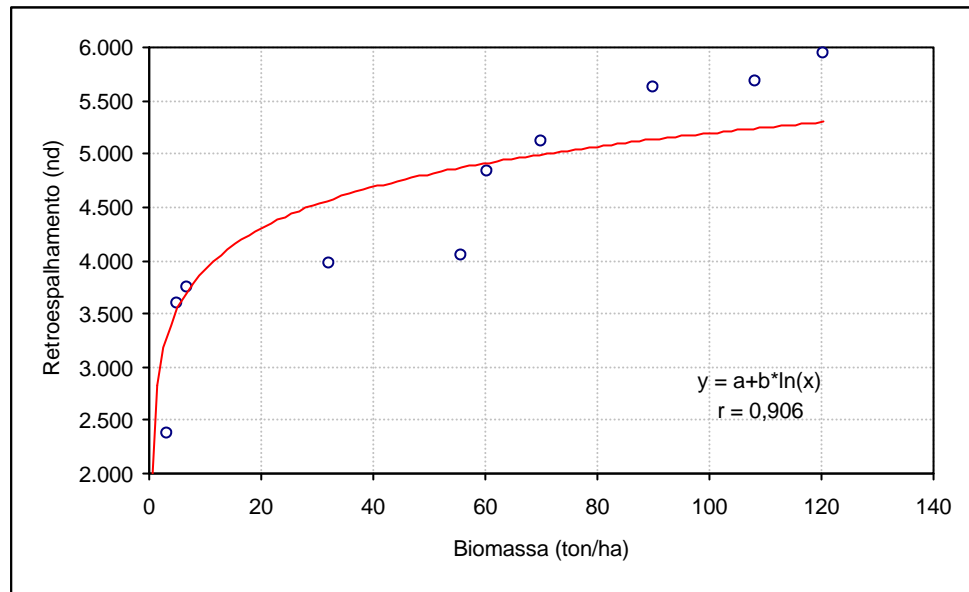


Figura 2: Curva que mostra a relação entre os valores de fitomassa arbórea aérea e os valores de retrospealhamento em unidades de números digitais da imagem JERS-1.

Podemos observar que a variável independente (x) ou biomassa apresenta um coeficiente de correlação $r = 0,906$ com a variável dependente (y) ou número digital. A fórmula desta curva é definida pela **Equação 2**:

$$y = a + b \cdot \ln(x) \quad \text{(Equação 2)}$$

$$a = 2646,6228$$

$$b = 553,03205$$

A **Figura 3** mostra a curva que relaciona os valores de biomassa aérea florestal com os valores de retrospealhamento em dB para as mesmas áreas na imagem JERS-1.

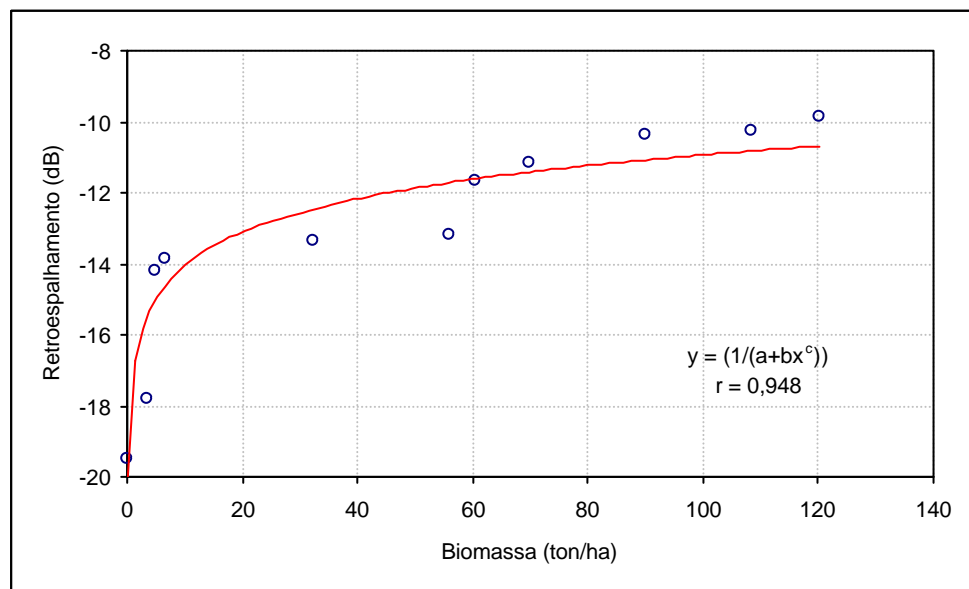


Figura 3: Curva que mostra a relação entre os valores de fitomassa arbórea aérea e os valores de retrospealhamento em unidades de decibéis (dB) da imagem JERS-1.

A **Equação 3** define esta curva que relaciona ambas variáveis.

$$y=1/(a+bx^c) \quad \text{(Equação 3)}$$

$$a = -0,046029471$$

$$b = -0,010977094$$

$$c = 0,31863977$$

A análise das curvas permite concluir que, a incrementos nos valores de fitomassa, correspondem incrementos decrescentes nos valores de retroespalhamento, tanto quando eles são expressos em unidades adimensionais (número digital) como quando são expressos em unidades de decibéis (dB). É evidente uma tendência da curva à estabilidade a medida que aumentam os valores da variável independente, biomassa.

O comportamento de ambas variáveis permite sugerir a utilidade das imagens de radar na banda L, especificamente do sensor imageador de microondas do satélite JERS-1 na quantificação de fitomassa florestal aérea em áreas de cerrado.

As microondas interagem com os troncos das árvores, e o sinal de retorno está relacionado à quantidade de biomassa em pé. No entanto, é importante salientar que o sinal está influenciado tanto pelas árvores vivas quanto pelas mortas. Assim, é necessário considerar que os dados que podem ser derivados a partir das imagens de radar integram o sinal da biomassa viva e morta em pé.

A tendência à estabilidade da curva, à medida que se incrementam os valores de biomassa, poderia ser responsável por uma diminuição da eficácia desta ferramenta em condições florestais muito densas, como no caso de florestas tropicais pluviais.

Santos *et al* (2002) também utilizaram imagens de radar JERS-1 na quantificação de fitomassa aérea de cerrado e floresta Amazônica, numa área de contato entre estas duas formações vegetais. Estes autores acharam na sua área de estudo valores de biomassa que superavam grandemente os do limite superior do presente trabalho. Muito embora o tipo de cerrado com que estes autores trabalharam difere muito do estudado neste trabalho, eles acharam que o comportamento de ambas variáveis era similar aos apresentados aqui.

Numa análise qualitativa, Sano *et al.*(2001) utilizaram imagens do mesmo satélite para a separação de fisionomias vegetais de cerrado na região central de domínio deste bioma. Estes autores acharam valores de retroespalhamento (σ) de -6,67 dB para floresta de galeria. No presente trabalho os valores de σ para o cerrado com maior biomassa flutuaram em torno do valor ($\sigma = -9,86$). Sano e colaboradores acharam também valores de $\sigma = 13,6$ dB nas áreas de cerrado *stricto sensu* mais aberto, enquanto que neste trabalho os valores de retroespalhamento em áreas dessa fisionomia oscilaram entre -17,8 e -13,2 dB.

É importante salientar a validade do presente trabalho, pois a imagem JERS-1 foi adquirida pelo satélite seis anos antes da realização dos trabalhos de campo. O tempo transcorrido sem dúvida provocou mudanças na vegetação. A amplitude dessas mudanças é muito difícil de se quantificar, mas o estado de conservação do fragmento de cerrado é considerado muito bom, o que sustenta a validade dos resultados obtidos.

A metodologia mostra-se adequada para a quantificação de fitomassa aérea em áreas de cerrado. Os autores consideram conveniente desenvolver trabalhos tendentes a definir o limite superior de biomassa que pode ser quantificado através das imagens JERS-1.

5. Referências

Castro, E. A. de.; Kauffman, J. B. Ecosystem Structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, v. 14, p. 263-283, 1998.

Delitti, W. B. C.; Meguro, M.; Pausas, J. *Allometric relations and biomass estimates in cerrado ecosystems*. Não publicado. Comunicação pessoal. São Paulo, 2002. 34 p.

Durigan, G. Levantamento Botânico Expedido no Município de Campos Novos Paulista SP. 1999. Dados em: <http://sinbiota.cria.org.br/>.

Huete, A.; Liu, H. Q.; Van Leeuwen, J. D. The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation. IEE Transactions on Geosciences and remote sensing In Proceedings of IGARSS '97 - International Geosciences and Remote Sensing Seminar (Vol. 4, 1966-1968). Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications. 1997.

Jackson, R. D.; Huete, A. R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, n. 11, p.185-200, 1991.

Kronka, F.; Matsukuma, C. K.; Nalon, M. A.; Del Cali, I. H.; Rossi, M.; Mattos, I. F. A.; Shin-Ike-Ywane, M. S.; Pontinhas, A. A. S. *Inventário Florestal do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto Florestal do Estado de São Paulo/ SEMA, 1993.

Luckman, A.; Baker, J.; Honzák, M.; Lucas, R. Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR: Seasonal Variation, Confidence Limits, and Application to Image Mosaics. *Remote Sensing of Environment*, n. 63, p. 126-139, 1998.

Mueller-Dombois, D., Ellemberg, H. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New York: Wiley, 1974. 547 p.

Rosenqvist, A. Evaluation of JERS-1, ERS-1 and ALMAZ SAR backscatter for rubber and oil palm stands in West Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, n. 17, p. 3219-3231, 1996.

Sano, E.E.; Pinheiro, G.G.C. e Meneses, P.R. 2001. Assessing JERS-1 synthetic aperture radar data for vegetation mapping in the Brazilian savanna. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, Vol.21, n.2, pp.158-167.

Santos, J. R.; Keil, M.; Araújo, L. S.; Pardi Lacruz, M. S.; Krämer, J.C. M.; Kandler. Biomass estimation of Forest and savanna transition vegetation zone by JERS-1 and SIR-C backscatter data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam. (33), part 7, 377-381. 2000.

São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. *Cerrado: bases para conservação e uso sustentável das áreas de cerrado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 1997. 113 p.

Shimada, M. *User's guide to NASDA's SAR products*. Ver. 2. NDX-000291. Tokyo Japan: NASDA, 2001. 24 p.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) no âmbito do programa BIOTA/FAPESP – O Instituto Virtual da Biodiversidade (www.biota.org.br) a través do Projeto “The Conservation Feasibility of Cerrado Remnants in São Paulo State” (processo 98/05251-0). Também contou com apoio da Agencia Espacial Japonesa, NASDA a través do Projeto: “Describing Savannas Physiognomies and Seasonal Tropical Forests Using Temporal SAR (JERS-1) and Optical Images (Landsat) in São Paulo State - Brazil” (NASDA reg. J2RI-013).

Os autores desejam expressar seu agradecimento também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, ao técnico Paulo César Fernandes e aos alunos Marina Amado de Almeida e Carlos L. de Barros Tomba, da Universidade de São Paulo pela colaboração nos trabalhos de campo.