

AVALIAÇÃO DE IMAGENS *QUICKBIRD* PARA ESTIMATIVA DE FITOMASSA AÉREA DO CERRADO

EVALUATION OF QUICKBIRD DATA TO ESTIMATE ABOVEGROUND CERRADO PHYTOMASS

Eduardo da Silva Pinheiro ¹, Giselda Durigan ², João Roberto dos Santos ³

¹ Universidade Federal do Amazonas, Campus Universitário. Av. Gen. Rodrigo Octávio Jordão Ramos, 3000, 69077-000 - Manaus, AM, Brasil; ² Instituto Florestal, Floresta Estadual de Assis, Caixa Postal 104, 19800-000 - Assis, SP, Brasil; ³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil.
e-mail: ¹ pinheiro@ufam.edu.br; ² giselda@femanet.com.br; ³ jroberto@dsr.inpe.br

RESUMO

Estimar a fitomassa com precisão em áreas extensas tem sido um grande desafio e a utilização de sensoriamento remoto com esta finalidade foi objeto do presente estudo. São apresentados os resultados da avaliação de imagens com alta resolução espacial do *QuickBird* para estimar a fitomassa de cerrado *lato sensu* na Estação Ecológica de Assis (EEcA). A unidade de conservação preserva um dos poucos remanescentes do Cerrado no estado de São Paulo. A fitomassa do cerrado foi estimada por meio de equações alométricas. Utilizou-se a Regressão Robusta com reamostragem *Bootstrap* para explorar as relações entre a fitomassa aérea do cerrado e as imagens do *QuickBird*, índices espectrais de vegetação (IV), componentes principais (CP) e modelo linear de mistura espectral (MLME). Na EEcA, os valores médios de fitomassa aérea e total do cerrado *stricto sensu* foram próximos aos descritos na literatura para o cerrado do Brasil Central e os valores médios de fitomassa aérea e total do cerradão aproximaram-se aos descritos para florestas estacionais. As bandas espectrais *QuickBird* apresentaram correlações fracas a moderadas com a fitomassa aérea do cerrado. As transformações espectrais (IV e CP) melhoram, em geral, a predição da fitomassa aérea de cerrado. Contudo as correlações se mantiveram entre fracas a moderadas.

Palavras-chaves: cerrado, imagem de alta resolução, regressão robusta.

ABSTRACT

Estimating phytomass of vast areas with high precision has been a challenge and using remote sensing for that was the subject of the present study. High-resolution satellites images *QuickBird* were used to estimate phytomass of cerrado at Assis Ecological Station (EEcA), located in the southwestern São Paulo State, Brazil. This protected area preserves one of the few Brazilian cerrado (savanna) biome remnants in the State. The cerrado phytomass was estimated by allometric equations. Robust Regression and Bootstrap methods were used to explore relationships between aboveground cerrado phytomass and remote sensing data of *QuickBird* (spectral bands, vegetation index - VI, principal components - PC, linear spectral mixture model - LSMM). Values of medium phytomass obtained for the cerrado *stricto sensu* at EEcA were close to those described in the literature for Central Brazilian cerrado. The values of medium phytomass of the woodland cerrado were close to those described for seasonal forests. Spectral bands of *QuickBird* sensor presented weak to moderate correlations with the aboveground cerrado phytomass. In general, spectral transformations (VI and PC) improved the prediction of the cerrado phytomass. The correlation, however, remained from weak to moderate.

Key words: cerrado, high-resolution image, robust regression.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera propiciou uma ampla discussão e pesquisas referentes à produtividade primária e estimativa de matéria orgânica acumulada em ecossistemas (BROWN et al., 1989; DIXON et al., 1994). As informações sobre fitomassa tornaram-se importantes para entender o papel das florestas no ciclo global do carbono, particularmente no processo de fixação e estoque de carbono (BROWN et al., 1989).

A necessidade de quantificar e aprimorar a compreensão dos estoques de carbono terrestre tem estimulado inúmeras pesquisas, com intuito de avaliar a capacidade de estimar fitomassa por meio de sensoriamento remoto (ROSENQVIST et al., 2003). O uso desta tecnologia para estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação tem sido um desafio, principalmente no que se refere a paisagens tropicais, onde a diversidade de formações vegetais e espécies é elevada (FOODY et al., 2003; CLARK et al., 2004).

O Cerrado está entre a 25 áreas consideradas críticas para conservação da diversidade biológica no mundo (*hotspots*), devido à sua riqueza e à alta pressão antrópica a que vem sendo submetido (MYERS et al., 2000). Estudos indicam que permanecem intactos apenas 20% da cobertura original do Cerrado e somente 2,2% deste bioma estão inseridos em áreas protegidas (MACHADO et al., 2004). As pressões antrópicas, principalmente o setor agropecuário, determinaram significativos danos ambientais ao Cerrado (ALGER e LIMA, 2003). Enquanto o Cerrado é desmatado e fragmentado em pequenas manchas, ainda permanecem lacunas no conhecimento sobre sua importância para o balanço de energia, água, fitomassa e carbono.

No Cerrado, as pesquisas que utilizaram técnicas de sensoriamento remoto na análise de parâmetros biofísicos e estimativa de fitomassa ainda são incipientes e com diferentes abordagens, do ponto de vista de sensores (SANTOS 1988; ARAÚJO 1999; KUNTSCHIK e BITTENCOURT 2003; FERREIRA et al., 2004). O objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade de realizar estimativas de fitomassa do cerrado *lato sensu* a partir de imagens com alta resolução espacial do *QuickBird (QB)*. Além das bandas espectrais do sensor, também foram avaliadas transformações multiespectrais, a saber: índices espectrais de vegetação (IV); componentes principais (CP) e modelo linear de mistura espectral (MLME).

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Estação Ecológica de Assis (EEcA), localizada no sudoeste do estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°33'20" a 22°37'41" Latitude Sul e 50°24'4,8" a 50°21'27" Longitude Oeste de Greenwich. A EEcA está inserida em uma zona de transição entre os tipos climáticos *Cwa* e *Cfa*, segundo a classificação de *Köppen*, caracterizada como subtropical, com chuvas concentradas no verão e estação seca no inverno, com duração variável (FARIA et al., 2004). Dados locais compilados, correspondentes a 20 anos, demonstram que o período com excedente hídrico ocorre de dezembro a março, totalizando 165 mm, e o período mais seco entre abril a setembro, sendo que as deficiências hídricas médias não excedem a 20 mm (RODRIGUES et al., 2002). Na unidade de conservação, a vegetação pode ser classificada como cerrado *lato sensu*. A fitofisionomia dominante é o cerradão, ocupando 91,43% da área, com árvores que chegam até 15 m de altura e formam uma cobertura arbórea fechada. Também ocorrem pequenas manchas de vegetação com estrato arbóreo descontínuo, o que configura a fitofisionomia de cerrado *stricto sensu*, ocupando uma área de 3,4% da unidade de conservação. Ao longo dos córregos, verificam-se a mata-galeria com estrato arbóreo denso, e nos terrenos úmidos uma vegetação herbácea e arbustiva exclusivamente higrófila (DURIGAN et al., 1999).

O levantamento da vegetação de cerrado foi realizado durante os meses de março e abril de 2006. A amostragem da vegetação foi efetuada utilizando o método de parcelas. Todos os indivíduos arbóreos vivos e com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou superior a 5 cm foram amostrados. Os dados de campo utilizados na quantificação de fitomassa foram oriundos de 40 parcelas de 20 x 40 m, sendo 20 cobertas por cerrado *stricto sensu* e 20 cobertas por cerradão (Figura 1b), todas georreferenciadas com um GPS *Trimble Pro-XR*, empregando-se o método DGPS com coordenadas pós-processadas. As 20 parcelas de cerrado *stricto sensu* e 10 das parcelas de cerradão foram levantadas durante o presente estudo. Os dados dendrométricos das outras 10 parcelas de cerradão foram obtidos a partir do banco de dados do projeto temático “*Diversidade, dinâmica e conservação em florestas do Estado de São Paulo: 40 ha de parcelas permanentes*” (BIOTA/FAPESP 1999/09635-0).

O método indireto, descrito por Sanqueta (2002), foi aplicado para estimar a fitomassa total e aérea contida nas parcelas de cerrado. Para tanto, utilizaram-se dados biométricos: DAP e altura total (h), por meio de equações alométricas especificamente desenvolvidas para diferentes fisionomias de cerrado na área de estudo por Melo et al. (dados não publicados). A fitomassa total foi composta pelas raízes, tronco, ramos e folhas, e a fitomassa aérea exclui as raízes.

Para realizar este estudo foram utilizados dados do satélite *QuickBird* imageados em 04/07/2006, bandas espectrais (B1 - 450-520 nm; B2 - 520-600 nm; B3 - 630-690 nm e B4 - 760-900 nm). No estudo também foi utilizada uma base cartográfica digital em escala 1:10.000, contendo informações referentes às estradas, hidrografia e curvas de nível com equidistância de 10 metros.

Os valores de níveis de cinza das bandas espectrais do *QB* foram transformados para valores de radiância, segundo o método descrito por Krause (2003). Em seguida, foram executados os procedimentos de correção atmosférica e conversão dos valores de radiância para reflectância na superfície. A correção atmosférica das imagens foi realizada no módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), disponível no ENVI 4.3. O FLAASH é baseado em modelos físicos e incorpora o código de transferência de radiação MODTRAN4⁺ (RSI, 2006). Entre os parâmetros utilizados para correção atmosférica foram adotados o modelo atmosférico *Middle Latitude Summer* e o modelo de aerossol Rural, conforme descrito por RSI (2006), que considera condições meteorológicas na data da aquisição das imagens. Para corrigir as distorções da imagem *QB*, utilizou-se o modelo função racional descrito por Tao e Hu (2001). Com esta finalidade foram empregados 25 pontos de controle, adquiridos na base cartográfica 1:10.000, dados dos coeficientes polinomiais racionais (RPC) e um modelo digital de elevação (MDE), obtendo-se um *EMQ* de 2,59 m.

Cada uma das 40 parcelas de 800 m² foi sobreposta às bandas do *QB*, convertidas para reflectância, bem como às transformações multiespectrais, a saber: dez índices espectrais de vegetação descritos na literatura especializada; componentes principais e modelo linear de mistura espectral. Em seguida, foi extraída a média da resposta espectral dos *pixels* contidos na área de cada parcela. A Regressão Robusta com reamostragem pela técnica *Bootstrap*, com 10.000 repetições, foi empregada devido ao número relativamente pequeno das amostras, 20 para cada uma das fitofisionomias, cerrado *stricto sensu* e cerradão (EFRON 1982; WILLMOTT, 1985) foi utilizada para ajustar regressões lineares ($Y = a + bx + \varepsilon$), tendo como variável dependente a fitomassa aérea ou sua transformação logarítmica e como variáveis independentes as bandas espectrais e suas transformações. Construíram-se intervalos de confiança para o coeficiente de correlação de *Pearson* (*r*), com significância ao nível de 5% de probabilidade. O erro médio quadrático (*EMQ*) foi empregado para avaliar a precisão das associações entre as variáveis dependentes e independentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na EEcA, os valores médios de fitomassa aérea (23,22 Mg.ha⁻¹) e total (28,88 Mg.ha⁻¹) do cerrado *stricto sensu* foram próximos aos descritos na literatura para o cerrado do Brasil Central (SANTOS 1988; ABDALA et al., 1988; REZENDE et al., 2006; GUARINO e MEDEIROS, 2005). Os valores médios de fitomassa aérea (98,18 Mg ha⁻¹) e total (118,36 Mg.ha⁻¹) do cerradão aproximaram-se aos descritos para florestas estacionais (BROWN et al., 1989; GUARINO e MEDEIROS, 2005).

Os resultados demonstram correlações fracas a moderadas entre os dados do *QB* e a fitomassa aérea das duas fisionomias de cerrado analisadas (Tabela 1). As baixas relações obtidas podem estar associadas à grande diversidade florística e arquitetura complexa do cerrado na EEcA, à porcentagem de cobertura do solo, à iluminação e sombreamento e ao comportamento espectral das feições imageadas, uma vez que essas características produzem grandes incertezas em estimativas de fitomassa por meio de sensoriamento remoto (FOODY, et al., 2003; LU et al., 2004; CLARK et al., 2004). Além disso, a combinação entre estruturas vegetais arbóreas, herbáceas e de gramíneas do cerrado determina fortes variações nos parâmetros biofísicos (ASNER e WARNER 2003). Estudos recentes têm atribuído à influência das sombras do dossel a redução nos valores de reflectância e, em consequência, menores correlações entre a fitomassa e dados de sensoriamento remoto (ARAÚJO 1999; FOODY et al., 2003; LU et al., 2004; LEBOEUF et al., 2007).

Apenas a banda do infravermelho próximo apresentou correlação moderada com a fitomassa do cerrado *stricto sensu* (Tabela 1). Este resultado é consistente do ponto de vista do comportamento espectral da vegetação, uma vez que a reflectância é alta nesta faixa, em que as propriedades ópticas das folhas são dominadas principalmente por sua estrutura celular interna (PONZONI, 2001).

As bandas espectrais do *QB* obtiveram correlações moderadas com a fitomassa aérea do cerradão (Tabela 1). No entanto, apenas as relações obtidas pela banda do infravermelho próximo possuem consistência física.

Isso se explica pelo fato de que, na faixa do visível (400 a 700 nm), a reflectância e a transmitância são baixas, pois a maior parte da radiação solar é absorvida pelos pigmentos da planta durante a fotossíntese (PONZONI, 2001). Desta forma, seriam esperadas correlações negativas entre a fitomassa e esta faixa do espectro, o que não foi observado para as bandas do *QB*.

Tabela 1. Relações entre a fitomassa aérea do cerrado e dados do *QuickBird*, na Estação Ecológica de Assis, SP.

Table 1. Relationships between aboveground cerrado phytomass and QuickBird data at Assis Ecological Station, São Paulo, Brazil.

	Fitomassa						logFitomassa						
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r_m</i>	<i>EMQ</i>	<i>p-a</i>	<i>p-b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r_m</i>	<i>EMQ</i>	<i>p-a</i>	<i>p-b</i>	
Cerrado <i>stricto sensu</i>	<i>B1</i>	18,51	11,75	-0,243	10,533	0,191	0,275	2,47	9,20	-0,222	0,199	0,066	0,231
	<i>B2</i>	55,67	9,80	-0,183	10,718	0,210	0,388	0,97	10,65	-0,180	0,205	0,036*	0,329
	<i>B3</i>	31,96	9,80	-0,254	10,420	0,069	0,261	1,04	10,60	-0,267	0,195	0,001*	0,183
	<i>B4</i>	-34,72	13,15	0,410	9,946	0,226	0,083	-0,36	12,35	0,472	0,191	0,630	0,038*
	<i>SR</i>	-14,99	9,25	0,443	9,587	0,239	0,059	0,26	10,65	0,515	0,178	0,931	0,026*
	<i>DVI</i>	-5,19	10,40	0,397	9,533	0,261	0,070	0,09	11,05	0,492	0,183	1,000	0,032*
	<i>NDVI</i>	29,99	8,80	0,481	9,361	0,103	0,041*	1,31	10,00	0,545	0,173	0,280	0,017*
	<i>RDVI</i>	-27,30	10,95	0,468	9,338	0,128	0,041*	-0,55	6,40	0,556	0,174	0,437	0,015*
	<i>SAVI¹</i>	89,63	10,80	0,479	9,350	0,418	0,042*	1,77	8,55	0,560	0,174	0,130	0,015*
	<i>SAVI²</i>	23,91	8,05	0,477	9,350	0,135	0,042*	1,29	9,85	0,560	0,174	0,488	0,015*
	<i>SAVI³</i>	-14,92	9,80	0,476	9,350	0,075	0,042*	-0,01	9,45	0,561	0,174	0,101	0,015*
	<i>SAVI₂</i>	70,79	12,10	0,344	9,827	0,276	0,107	1,32	11,05	0,429	0,192	0,756	0,057
	<i>OSAVI</i>	37,75	10,55	0,487	9,351	0,102	0,041*	0,85	7,25	0,549	0,173	0,278	0,017*
	<i>MSAVI₂</i>	-14,81	11,50	0,490	9,328	0,057	0,038*	0,20	12,65	0,555	0,172	0,057	0,016*
	<i>TVI</i>	1,48	10,05	0,200	10,810	0,372	0,257	-0,95	9,85	0,267	0,213	0,477	0,152
	<i>EVI</i>	60,04	8,95	0,440	9,549	0,217	0,061	1,02	9,30	0,532	0,176	0,806	0,021*
	<i>CP₁</i>	15,76	10,70	0,199	10,839	0,537	0,266	-0,12	10,20	0,266	0,213	0,900	0,165
	<i>CP₂</i>	55,11	11,15	-0,499	8,852	0,005*	0,021*	1,51	13,30	-0,585	0,166	0,000*	0,008*
	<i>CP₃</i>	-57,74	8,00	0,310	7,841	0,018*	0,005*	-0,12	12,20	0,357	0,173	0,331	0,014*
	<i>CP₄</i>	22,61	11,85	-0,247	10,781	0,129	0,364	0,92	10,35	-0,262	0,206	0,007*	0,331
	<i>IjSI</i>	-61,99	10,80	-0,387	10,308	0,000*	0,126	-0,59	11,50	-0,425	0,183	0,000*	0,055
	<i>IjV</i>	34,27	9,20	0,491	8,240	0,158	0,010*	1,05	11,45	0,579	0,160	0,284	0,005*
	<i>IjSo</i>	-5,97	9,35	-0,060	11,103	0,188	0,763	0,59	8,15	-0,121	0,216	0,002*	0,604
	Cerradão	<i>B1</i>	-104,60	10,75	0,470	17,292	0,057	0,026*	-0,06	11,85	0,424	0,074	0,567
<i>B2</i>		-8,40	11,95	0,632	14,936	0,017*	0,004*	0,09	10,60	0,601	0,066	0,978	0,005*
<i>B3</i>		-35,69	12,00	0,599	15,883	0,056	0,009*	0,46	10,35	0,576	0,069	0,250	0,007*
<i>B4</i>		-0,33	9,80	0,574	15,878	0,260	0,012*	0,74	9,75	0,553	0,072	0,000*	0,015*
<i>SR</i>		4,01	10,40	0,277	18,633	0,837	0,222	0,84	10,10	0,257	0,085	0,002*	0,259
<i>DVI</i>		-8,51	12,45	0,542	16,288	0,478	0,020*	0,66	9,10	0,522	0,074	0,000*	0,026*
<i>NDVI</i>		-9,32	11,35	0,276	18,881	0,433	0,241	1,07	11,75	0,258	0,086	0,496	0,270
<i>RDVI</i>		-7,97	10,50	0,496	16,795	0,231	0,032*	0,75	9,70	0,478	0,076	0,017*	0,040*
<i>SAVI¹</i>		117,74	11,25	0,481	16,976	0,692	0,038*	1,51	9,10	0,460	0,077	0,000*	0,047*
<i>SAVI²</i>		84,80	12,60	0,481	16,976	0,207	0,038*	1,10	9,05	0,461	0,077	0,059	0,047*
<i>SAVI³</i>		-54,43	10,80	0,484	16,976	0,093	0,038*	0,46	10,60	0,463	0,077	0,964	0,047*
<i>SAVI₂</i>		94,38	12,50	0,559	16,112	0,278	0,016*	1,64	9,00	0,535	0,073	0,000*	0,019*
<i>OSAVI</i>		147,66	9,95	0,288	18,807	0,416	0,226	1,18	9,20	0,266	0,085	0,496	0,254
<i>MSAVI₂</i>		-88,92	10,85	0,288	18,837	0,292	0,229	0,49	9,90	0,270	0,085	0,651	0,255
<i>TVI</i>		-122,78	10,00	0,592	15,574	0,036*	0,008*	0,53	9,85	0,570	0,070	0,709	0,010*
<i>EVI</i>		183,52	11,50	0,521	16,513	0,338	0,024*	1,80	10,20	0,498	0,075	0,000*	0,031*
<i>CP1</i>		-27,94	10,40	0,601	15,477	0,181	0,008*	0,53	10,05	0,574	0,070	0,000*	0,010*
<i>CP2</i>		101,18	11,75	-0,437	17,352	0,003*	0,063	2,05	11,45	-0,424	0,080	0,000*	0,080
<i>CP3</i>		-14,79	10,25	0,343	18,638	0,949	0,178	0,88	8,50	0,347	0,086	0,000*	0,194
<i>CP4</i>		20,96	12,05	0,050	19,172	0,696	0,550	1,21	10,40	0,058	0,088	0,001*	0,640
<i>IjSI</i>		193,02	9,05	0,079	19,655	0,000*	0,640	-1,25	13,10	0,065	0,089	0,000*	0,683
<i>IjV</i>		74,87	10,30	0,455	17,261	0,630	0,054	1,25	10,60	0,442	0,079	0,000*	0,067
<i>IjSo</i>		-4,76	9,55	-0,640	14,606	0,000*	0,003*	0,62	11,75	-0,607	0,065	0,000*	0,004*

Onde, a = intercepto; b = inclinação da reta; r_m = coeficiente de correlação médio estimado pela técnica *Bootstrap* com 10.000 repetições; EMQ = Erro médio quadrático; $p-a$ = p -value do intercepto; $p-b$ = p -value da inclinação da reta. $B_{1,2,3,4}$ = bandas espectrais do *QuickBird*; Índices de vegetação (SR = *Simple Ratio*; $NDVI$ = *Normalized Difference Vegetation Index*; TVI = *Transformed Vegetation Index*; DVI = *Difference Vegetation Index*; $SAVI$ = *Soil Adjusted Vegetation Index* ($^1 L = 0,25$; $^2 L = 0,5$; $^3 L = 1$); $SAVI_2$ = *Soil Adjusted Vegetation Index 2*; $MSAVI_2$ = *Modified Soil Adjusted Vegetation Index*; $RDVI$ = *Renormalized Difference Vegetation Index*; $OSAVI$ = *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*; EVI = *Enhanced Vegetation Index*); CP = Componentes principais; Modelo linear de mistura espectral (IfS = Imagem fração solo; IfV = Imagem fração vegetação; $IfSo$ = Imagem fração sombra); * Significativo a 5% de probabilidade.

A explicação para esta anormalidade pode estar associada, entre outros fatores, à saturação do Índice de Área Foliar (IAF). O cerrado *stricto sensu* apresentou cobertura arbórea de 46,3% a 70,4%. A cobertura arbórea do cerradão ultrapassou 90%. Assim, a maior cobertura arbórea do cerradão determinaria maior IAF e menor reflectância na faixa do visível. Contudo, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), estas relações não são lineares, podendo ocorrer situações anômalas na reflectância do dossel, conhecidas como pontos de saturação do IAF, em que o aumento do IAF não altera os valores de reflectância.

A análise da altura dos indivíduos arbóreos permitiu constatar que o dossel do cerrado *stricto sensu* é menos rugoso que o dossel do cerradão, com desvios-padrão de 2,10 e 3,02 m, respectivamente. Como a imagem *QB* possui alta resolução espacial, permite retratar com maior fidelidade a rugosidade do dossel do cerradão e, conseqüentemente, há maior variância da reflectância. Além disso, a cobertura arbórea desta fitofisionomia pode estar acima do ponto de saturação do IAF. Estes fatores, associados, podem ter alterado as relações radiométricas entre a cena *QB* e a fitomassa do cerradão.

A menor porcentagem de cobertura arbórea no cerrado *stricto sensu*, sobretudo no cerrado típico, influenciou as relações entre a fitomassa e as bandas espectrais do *QB*. A maior exposição do solo aumentou os valores de reflectância, essencialmente na faixa da radiação fotossinteticamente ativa, explicando as fracas correlações entre as bandas do visível e a fitomassa do cerrado *stricto sensu* (Tabela 1). Na EECa, os Latossolos vermelhos representam cerca de 93%, sendo importante destacar que este solo possui alta reflectância da faixa do visível. Nas imagens *QB* essas influências são mais pronunciadas devido à alta resolução espacial, que possibilita melhor distinção dos objetos na superfície, resultando em *pixels* mais puros. Desta forma, a proporção solo-vegetação é mais bem definida, quando comparada com uma imagem com média resolução espacial, por exemplo, dados do sensor *TM/Landsat*.

Uma importante discussão é o fato das imagens *QB* utilizadas no estudo corresponder apenas ao período seco. Nos meses do levantamento da vegetação, segundo dados da estação meteorológica do IAC no local, a precipitação total foi de 68 mm e 44 mm, respectivamente nos meses de março e abril, em julho quando a imagem foi adquirida a precipitação foi de 23,4 mm. Segundo Oliveira (1998), as variações sazonais são características básicas do clima e da vegetação do cerrado, embora tais alterações não afetem igualmente as várias formas de vida e estratos da vegetação. A sazonalidade não limita estritamente a fenologia de espécies lenhosas de cerrado. As plantas com sistemas radiculares profundos mantêm transpiração ativa e parecem ser menos afetadas pela condição de seca, que, todavia, exerce maior influência nas plantas herbáceas com sistemas radiculares menos profundos (OLIVEIRA, 1998). Pesquisas com dados de sensoriamento remoto (FERREIRA et al., 2004 e 2005; BECERRA et al., 2007) também constata estas observações fenológicas no cerrado. Estes estudos foram realizados nos cerrados do Brasil Central, onde a variabilidade sazonal da oferta hídrica é maior do que a observada na área deste estudo. Portanto, espera-se que na região da EECa o período seco seja menos intenso e assim, de forma geral, as variações nos valores de correlação entre fitomassa aérea e dados de sensoriamento remoto, independentemente do período sazonal, não sofrem alterações significativas.

De modo geral, foram obtidas melhores correlações entre os índices de vegetação e a fitomassa de cerrado da EECa, em comparação com as bandas espectrais individuais. Entretanto, os resultados das relações entre os índices e a fitomassa (cerrado *stricto sensu* e cerradão) ainda foram baixos (Tabela 1). É importante destacar que todos os IV apresentaram relações consistentes do ponto de vista físico, uma vez que todas as correlações foram positivas (Tabela 1). Aparentemente, a influência da sombra das copas das árvores, descrita anteriormente, influenciou também os valores dos índices de vegetação. Segundo Asner e Warner (2003), em imagens *Ikonos-II* do cerrado, as sombras exerceram um controle maior sobre a resposta espectral

do vermelho em relação ao infravermelho próximo: cerca de 15 a 50% das respostas de vermelho, dependendo da densidade de plantas lenhosas na paisagem. Como os índices de vegetação utilizam essas bandas espectrais, também foram afetados.

Os índices de vegetação *SAVI*, *RDVI* e *MSAVI₂* apresentaram as melhores correlações e menores *EMQ* com o logaritmo da fitomassa do cerrado *stricto sensu* (Tabela 1). Estes IV foram propostos para atenuar os efeitos do solo nas respostas espectrais da vegetação. Em densidades baixas de cobertura vegetal, a curva da vegetação tende a aproximar-se da curva de solo, passando por uma mistura de respostas espectrais para densidades médias e quase nenhuma influência do solo para densidades altas de vegetação (HUETE, 1988; MAJOR et al., 1990; RONDEAUX et al., 1996). O índice de vegetação *TVI* demonstrou melhor capacidade de predição da fitomassa do cerrado. Pesquisa realizada por Santos (1988) descreveu este mesmo índice de vegetação com resultados satisfatórios para estimar a fitomassa foliar do cerrado *stricto sensu* no Brasil Central.

A transformação dos dados *QB* por análises de componentes principais também gerou correlações fracas a moderadas com a fitomassa do cerrado da EEcA (Tabela 1). No entanto, as correlações foram levemente superiores do que as outras transformações espectrais das imagens *QB*. A *CP₂* apresentou a melhor correlação com o logaritmo da fitomassa do cerrado *stricto sensu* e a *CP₁* obteve a melhor correlação a fitomassa do cerrado (Tabela 1).

Para estimar a fitomassa área das duas fitofisionomias de cerrado da EEcA, o modelo linear de mistura espectral não obteve resultados superiores aos encontrados pelos índices de vegetação ou componentes principais (Tabela 1). Embora a imagem fração da sombra gerada a partir do MLME tenha apresentado correlação moderada e negativas com a fitomassa do cerrado (Tabela 1), avalia-se que as correlações negativas não possuem consistência física do ponto de vista do comportamento espectral da vegetação. Estes resultados também divergem daqueles obtidos em outras pesquisas. Araújo (1999) encontrou correlação moderada e positiva entre fitomassa de savanas e imagem fração sombra ($r = 0,48$), gerada com dados *TM/Landsat-5*. Nessa pesquisa a autora também identificou uma correlação forte e positiva entre essa imagem e a fitomassa florestal ($r = 0,88$).

Na tentativa de explicar as correlações negativas obtidas entre a imagem fração sombra e a fitomassa do cerrado, é importante destacar dois aspectos relativos a esta fitofisionomia. O primeiro trata-se da saturação de seu IAF, descrito anteriormente. O segundo está associado ao processo histórico de evolução do cerrado observado por Pinheiro e Durigan (2007). A vegetação da EEcA vem sofrendo um importante processo de regeneração, sendo que em 44 anos analisados observou-se notável expansão das áreas de cerrado. Na EEcA, esta fitofisionomia representa um tipo de vegetação ecotonal entre o cerrado típico e a floresta estacional semidecidual, que está se expandindo sobre fisionomias abertas de cerrado, evoluindo estruturalmente para menor densidade e maior fitomassa, com tendência à diminuição da densidade relativa de espécies exclusivas do cerrado (GIAMPIETRO, 2005). Ainda que o cerrado tenha maior sombreamento que o cerrado *stricto sensu*, avalia-se que o aumento das sombras não explica o acréscimo de fitomassa, como observado em florestas. A grande complexidade estrutural do cerrado e a possível saturação do IAF podem ter gerado distorções nos valores dos coeficientes de correlação entre essas variáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, as estimativas da fitomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e cerrado realizadas a partir bandas espectrais individuais do *QuickBird*, apresentam correlações fracas a moderadas, contudo algumas relações foram significativas a 5% de probabilidade.

As transformações espectrais (índices de vegetação, componentes principais e modelo linear de mistura espectral), quando comparadas com as bandas espectrais individuais, melhoram, em geral, a predição da fitomassa aérea do cerrado; contudo, as correlações ainda permanecem fracas a moderadas. Para estimar a fitomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e do cerrado, os melhores índices de vegetação foram o *SAVI_{L=1}* e o *TVI*, respectivamente. A transformação por componentes principais apresenta, em geral, correlações superiores com a fitomassa aérea do cerrado e o erro médio quadrático menor, quando comparada com outras transformações espectrais.

O modelo linear de mistura espectral, quando comparado com as outras transformações espectrais das imagens, não apresentou resultados superiores na predição da fitomassa aérea do cerrado, na EECA. A complexidade de selecionar um *pixel* realmente puro representa a maior limitação para calcular o MLME e, como consequência, para estimar a fitomassa do cerrado com alta confiabilidade. Uma vez que outras transformações espectrais mais simples de serem executadas, sobretudo as análises por componentes principais, demonstraram melhores correlações com a fitomassa do cerrado, recomenda-se o uso destas técnicas como opção ao MLME.

O acelerado processo de conversão da vegetação natural em outras formas de uso da terra tem aumentado o interesse, em nível regional e global, por mapeamentos e estimativas da fitomassa, na busca de um comprometimento na redução de emissões de gases do efeito estufa. Ainda que imagens do *Quickbird* possuam limitações para estimar significativamente a fitomassa de fitofisionomias do cerrado, esses dados de alta resolução podem ainda subsidiar a classificação e estratificação da paisagem, auxiliando nos planos de manejo e inclusive, no delineamento temático em grande detalhe de fenômenos naturais e antrópicos que porventura ocorram nesse bioma savânico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Rodrigues da ESALQ/USP por disponibilizar os dados de vegetação de cerrado da parcela permanente na Estação Ecológica de Assis, bem com a imagem *QuickBird* utilizada neste estudo. Ao doutorando Marcos Adami do INPE/MCT pelo auxílio na elaboração da programação em Matlab.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, G. C. et al. Above and belowground organic matter and root: shoot ratio in a cerrado in Central. *Brazilian Journal of Ecology*, v. 2, p. 11-23, 1998.
- ALGER, K.; LIMA, A. Políticas públicas e a fragmentação de ecossistemas. In: RAMBALDI, D.M.; OLIVEIRA, D.A.S. *Fragmentação de ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas*. MMA, Brasília, 2003. Seção IV, Cap. 16, p. 390-420.
- ARAÚJO, L. S. *Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1*. 1999. 129f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE-7253-TDI/696, 1999.
- ASNER, G. P.; WARNER, A. S. Canopy shadow in Ikonos satellite observations of tropical forest and savannas. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 521-533, 2003.
- BECERRA, J. A. B. et al. Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região do cerrado usando índices espectrais de vegetação. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13, 2007, Florianópolis. São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3747-3754.
- BROWN, S. et al. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*, v. 35, p. 881-902, 1989.
- CLARK, D. B. et al. Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecological Applications*, v. 14, n. 1, p. 61-74, 2004.
- DIXON, R. K. et al. Carbon pool and flux of global forest ecosystems. *Science*, v. 263, p. 185-190, 1994.
- DURIGAN, G. et al. Inventário florístico do cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP. *Hoehnea*, v. 26, p. 149-172, 1999.
- EFRON, B. *The Jackknife, the Bootstrap and other resampling plans*. Society for industrial and applied mathematics, 1982. 92 p.

- FARIA, A. J. et al. Monitoramento micrometeorológico em cinco ambientes com cobertura vegetal distinta. In: BOAS, O.V.; DURIGAN, G. *Pesquisas em conservação e recuperação ambiental no oeste paulista: resultados da cooperação Brasil/Japão*. São Paulo: Páginas & Letras, 2004. Cap. 6. p. 93-108.
- FERREIRA, L. G.; et al. Optical characterization of the Brazil-Savanna physiognomics for improved land cover monitoring of the cerrado biome: preliminary assessments from an airborne campaign over an LBA core site. *Journal of Arid Environments*, v. 56, issue 3, p. 425-447, 2004.
- FERREIRA, M. E. et al. Análise da sazonalidade de paisagens antrópicas e nativas do bioma Cerrado através dos produtos MODIS índices de vegetação, área foliar e atividade fotossintética. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, 2005, Goiânia, São José dos Campos: INPE, 2005. p. 505-512.
- FOODY, G. M. et al. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat *TM* data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, v. 85, p. 463-474, 2003.
- GIAMPIETRO, R. *Modificações na estrutura e composição florística de matas ciliares na região do Médio Paranapanema (1992-2004)*. 2005 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- GUARINO, E. S. G.; MEDEIROS, M. B. Levantamento da fitomassa dos estratos arbóreo e herbáceo-arbustivo da área de influência direta do aproveitamento hidrelétrico Corumbá IV (GO). *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, jul. 2005, 20 p.
- HUETE, A. R. A. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- KRAUSE, K. *Radiance conversion of QuickBird data*. Colorado, USA. DigitalGlobe, 2003. 4 p. (Technical note). Disponível em: <http://www.digitalglobe.com> Acessado em: 7 jun., 2004.
- KUNTSCHIK, G.; BITTENCOURT, M. D. Quantificação de fitomassa florestal aérea de cerrado e cerradão através de imagens orbitais SAR. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, 2003. Belo Horizonte. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2201-2208.
- LEBOEUF, A. et al. A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using QuickBird imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 110, p. 488-500, 2007.
- LU, D. et al. Relationships between forest stand parameters and Landsat *TM* spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, v. 198, p. 149-167, 2004.
- MACHADO, R. B. et al. *Estimativas de perda de área de Cerrado brasileiro*. Brasília: Conservação Internacional, 2004. 23 p. (Relatório técnico não publicado).
- MAJOR, D. J. et al. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, v. 11, p. 727-740, 1990.
- MELO, A. C. G. et al. *Resultados dos ajustes dos modelos de biomassa para cerradão e cerrado ss*. Piracicaba: IF-ESALQ-USP, 2007. 58 p. (Relatório técnico não publicado).
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853-858, 2000.
- OLIVEIRA, P. E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina/DF: EMBRAPA-CPAC, 1998. Capítulo 4. p. 169-192.
- PINHEIRO, E. S.; DURIGAN, G. Evolução fisionômica do Cerrado (1962-2006) na Estação Ecológica de Assis, São Paulo, Brasil. In: *Anais do Congresso Nacional de Botânica*, 58, 2007. São Paulo: SBB, 2007. Resumos.
- PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. UNB. Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. Cap. 5, p. 157-199.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURU, Y. E. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos, SP. Editora Parêntese. 2007. 127 p.
- RESEARCH SYSTEMS, INC (RSI). *FLAASH user's guide: ENVI FLAASH*. Version 4.3. Boulder: RSI, 2006. 42 p.

- REZENDE, A.V. et al. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. *Scientia Forestalis*, v. 71, p. 65-76, 2006.
- RODRIGUES, R. R. et al. Dinâmica, diversidade e conservação em florestas do Estado de São Paulo: 40ha parcelas permanentes. Piracicaba: ESALQ-USP, 2002. 126 p. (Relatório Científico I - FAPESP 1999/09635-0). Disponível em: <http://www.lerf.esalq.usp.br/parcelas/> Acessado em: 04 dez., 2005.
- RONDEAUX, G. et al. Optimisation of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 55, p. 95–107, 1996.
- ROSENQVIST, A. et al. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy*, v. 6, p. 441-455, 2003.
- SANQUETA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETA, C.R. et al. *As florestas e o carbono*. UFPR, Curitiba, 2002. Cap. 6, p. 119-140.
- SANTOS, J. R. *Biomassa aérea da vegetação de cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat*. 1988. 156f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.
- TAO, V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 67, 12, p.1347-1357, 2001.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. 12, p. 8995-9005, 1985.