

Imagens Landsat e *QuickBird* são capazes de gerar estimativas precisas de biomassa aérea de Cerrado?

Eduardo da Silva Pinheiro¹
Giselda Durigan²
Marcos Adami³

¹ Universidade Federal do Amazonas
Av. Gen. Rodrigo Octávio Jordão Ramos, 3000, 69077-000 - Manaus - AM, Brasil
pinheiro@ufam.edu.br

² Instituto Florestal, Floresta Estadual de Assis
Caixa Postal 104, 19800-000 - Assis, SP, Brasil
giselda@femanet.com.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
adami@dsr.inpe.br

Abstract. Estimating biomass of vast areas with high precision has been a challenge and using remote sensing for that was the subject of the present study. QuickBird and TM/Landsat data were used to estimate biomass 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 biomass was estimated by allometric equations. Robust Regression and Bootstrap methods were used to explore relationships between aboveground cerrado biomass and remote sensing data of QuickBird and TM/Landsat (spectral bands, vegetation index - VI, principal components - PC, linear spectral mixture model - LSMM). Values of medium biomass obtained for the cerrado *stricto sensu* at EEcA were close to those described in the literature for Central Brazilian Cerrado. The values of medium biomass of the woodland cerrado were close to those described for seasonal forests. Spectral bands of QuickBird and TM/Landsat sensor presented weak to moderate correlations with the aboveground cerrado biomass. In general, spectral transformations (VI and PC) improved the prediction of the cerrado biomass. The correlation, however, remained from weak to moderate.

Palavras-chave: Optical sensor, robust regression, protect área, sensor óptico, regressão robusta, unidade de conservação.

1. Introdução

Os efeitos negativos do aquecimento global e os compromissos assumidos por diversas nações no mundo visando à redução da emissão de gases poluentes estimularam inúmeras pesquisas com objetivo de desenvolver mecanismos para mitigação deste problema e a compreensão do balanço de carbono em ecossistemas terrestres (Rosenqvist et al. 2003). As informações sobre a biomassa vegetal 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). Em paisagens tropicais, onde a diversidade de formações vegetais e espécies é elevada, o uso de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas na estimativa de biomassa tem se constituído em um desafio (Foody et al. 2003; Clark et al. 2004).

Estando entre as 25 áreas críticas para a conservação da biodiversidade, de acordo com Myers et al. (2000), o Cerrado vem sendo submetido à alta pressão antrópica. Estudos demonstraram que permanecem intactos apenas 20% de sua cobertura original e somente 2,2% deste bioma estão inseridos em áreas protegidas (Machado et al. 2004). No estado de São Paulo, restam menos de 7% da cobertura original e apenas 0,5% estão protegidos em unidades de conservação (Durigan, 2006). Enquanto o Cerrado é desmatado e fragmentado

em pequenas manchas, ainda permanecem lacunas no conhecimento sobre sua importância para o balanço de energia, água, biomassa e carbono.

As pesquisas que utilizaram técnicas de sensoriamento remoto na análise de parâmetros biofísicos e estimativa de biomassa do Cerrado ainda são incipientes e com diferentes abordagens do ponto de vista de sensores (Santos 1988; Araújo 1999; Kuntschik e Bitencourt 2003; Ferreira et al. 2004; Bitencourt et al. 2007; Pinheiro et al. 2008). O objetivo deste estudo foi analisar o potencial de estoque de carbono na biomassa de diferentes fisionomias de Cerrado e avaliar a confiabilidade das estimativas desta biomassa com base em dados dos satélites *QuickBird* e Landsat-5. Também foram avaliadas transformações multiespectrais: índices espectrais de vegetação (IV); análise por componentes principais (CP) e modelo linear de mistura espectral (MLME) para gerar estas estimativas.

2. Metodologia de Trabalho

A pesquisa foi desenvolvida 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. A EEcA está inserida em uma zona de transição entre os tipos climáticos *Cwa* e *Cfa*, segundo a classificação de *Köppen*, caracterizada como subtropical. 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 EEcA, a vegetação pode ser classificada como cerrado *lato sensu*. A fisionomia dominante é o cerradão ocupando 91,43% da área, também ocorrem manchas de cerrado *stricto sensu* que representam 3,4% da área. Ao longo dos córregos, verificam-se a mata-galeria 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 biomassa foram oriundos de 40 parcelas de 20 x 40 m, sendo 20 cobertas por cerrado *stricto sensu* e 20 cobertas por cerradão, todas georreferenciadas com um GPS *Trimble Pro-XR*, empregando-se o método DGPS com coordenadas pós-processadas. Para estimar a biomassa foi aplicado o método indireto (Sanqueta 2002). 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).

As imagens *QuickBird* (*QB*) utilizadas no estudo foram de 04/07/2006, bandas espectrais (B1 - 450-520 nm; B2 - 520-600 nm; B3 - 630-690 nm e B4 - 760-900 nm) com resolução espacial de 2,4 m. As imagens *Thematic Mapper* (*TM*) do Landsat-5 foram de 24/06/2006, bandas espectrais (B1 - 450-520 nm; B2 - 520-600 nm; B3 - 630-690 nm; B4 - 760-900 nm; B5 - 1550-1750 nm; B7 - 2080-2350 nm) e resolução espacial de 30 m. Os valores de nível de cinza das imagens *QB* e *TM* foram transformados para valores de radiância. Em seguida, foram executados os procedimentos de correção atmosférica e conversão dos valores de radiância para reflectância de 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 (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 geométricas da imagem *QB*, utilizou-se o modelo função racional obtendo-se um erro médio quadrático (*EMQ*) de 2,59 m. A imagem *TM* foi registrada a partir de um modelo polinomial de 1º grau obtendo um *EMQ* de 0,46 pixel.

Cada uma das 40 parcelas de 800 m² foi sobreposta às bandas do *QB* e *TM*, convertidas para reflectância de superfície, bem como às transformações multiespectrais: dez índices espectrais de vegetação (Tabelas 3 e 4), componentes principais e modelo linear de mistura espectral. A Regressão Robusta com reamostragem pela técnica *Bootstrap*, com 10.000 repetições (Efron 1982; Willmott, 1985) foi utilizada para ajustar regressões lineares ($Y = a + bx + e$), tendo como variável dependente a biomassa 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 *EMQ* foi empregado para avaliar a precisão das associações entre as variáveis dependentes e independentes. Para corrigir a discrepância logarítmica na estimativa da variável dependente, determinada pela linearização do modelo logarítmico, foi aplicado um fator de correção $fc = \exp(0,5EMQ)$ descrito por Sprugel (1983).

3. Resultados e Discussão

Na área analisada, os valores médios de biomassa 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 biomassa 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 dois sensores avaliados *QB* e *TM* apresentaram correlações fracas a moderadas entre a reflectância das bandas espectrais e a biomassa aérea das duas fisionomias de cerrado analisadas (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Relações entre biomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e imagens *QuickBird* e *TM/Landsat*.

Cerrado <i>stricto sensu</i>		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	B1	18,51	11,75	-0,243	10,533	0,191	0,275	2,47	9,20	-0,222	1,105	0,066	0,231
	B2	55,67	9,80	-0,183	10,718	0,210	0,388	0,97	10,65	-0,180	1,108	0,036*	0,329
	B3	31,96	9,80	-0,254	10,420	0,069	0,261	1,04	10,60	-0,267	1,102	0,001*	0,183
	B4	-34,72	13,15	0,410	9,946	0,226	0,083	-0,36	12,35	0,472	1,100	0,630	0,038*
<i>TM</i>	B1	28,49	11,95	-0,291	10,770	0,142	0,243	0,76	8,85	-0,281	1,104	0,025*	0,181
	B2	19,37	10,65	-0,143	10,540	0,162	0,316	0,40	10,25	-0,172	1,108	0,035*	0,346
	B3	-13,68	10,70	-0,149	10,873	0,183	0,464	1,27	10,15	-0,176	1,110	0,010*	0,369
	B4	-76,17	11,70	0,232	10,298	0,328	0,180	-1,70	9,50	0,294	1,102	0,393	0,051
	B5	41,20	10,00	-0,559	9,221	0,004*	0,021*	1,19	12,20	-0,593	1,088	0,000*	0,010*
	B6	30,92	9,95	-0,508	9,334	0,002*	0,038*	0,97	10,65	-0,567	1,092	0,000*	0,018*
	B7												

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; EMQ^1 = EMQ corrigido pelo fator de correção ($fc = \exp(0,5EMQ)$); $p-a$ = p -value do intercepto; $p-b$ = p -value da inclinação da reta. B_{1,2,3,4,5,7}= bandas espectrais; * Significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 2. Relações entre biomassa aérea do cerradão e imagens *QuickBird* e *TM/Landsat*.

Cerradão		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	B1	-104,60	10,75	0,470	17,292	0,057	0,026*	-0,06	11,85	0,424	1,038	0,567	0,027*
	B2	-8,40	11,95	0,632	14,936	0,017*	0,004*	0,09	10,60	0,601	1,034	0,978	0,005*
	B3	-35,69	12,00	0,599	15,883	0,056	0,009*	0,46	10,35	0,576	1,035	0,250	0,007*
	B4	-0,33	9,80	0,574	15,878	0,260	0,012*	0,74	9,75	0,553	1,037	0,000*	0,015*
<i>TM</i>	B1	139,10	10,10	-0,403	19,404	0,047*	0,138	1,80	12,15	-0,381	1,045	0,001*	0,167
	B2	246,29	10,65	-0,231	19,878	0,146	0,471	1,39	11,20	-0,215	1,046	0,000*	0,457
	B3	35,18	11,15	-0,180	19,829	0,183	0,638	1,03	10,30	-0,158	1,046	0,000*	0,603
	B4	-9,96	7,65	0,512	17,230	0,636	0,046*	0,72	10,15	0,493	1,040	0,000*	0,060
	B5	0,16	11,15	0,447	16,807	0,520	0,056	0,69	10,90	0,446	1,039	0,001*	0,063
	B6	20,97	10,25	0,288	18,005	0,389	0,184	0,97	8,90	0,308	1,042	0,000*	0,200
	B7												

Abreviaturas na Tabela 1.

As baixas relações obtidas podem estar associadas à grande diversidade florística, a 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 biomassa por meio de sensoriamento remoto (Araújo 1999; Foody et al. 2003; Lu et al. 2004; Clark et al. 2004; Leboeuf et al. 2007). Além disso, a combinação entre plantas arbóreas, herbáceas e de gramíneas do cerrado determina fortes variações nos parâmetros biofísicos (Asner e Warner 2003).

Apenas a banda do infravermelho próximo do *QB* apresentou correlação moderada com a biomassa do cerrado *stricto sensu* (Tabela 1). Estas relações obtidas pela banda do infravermelho próximo possuem consistência física e 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 biomassa do cerrado e esta faixa do espectro, o que não foi observado para as bandas do *QB* (Tabela 2).

A menor porcentagem de cobertura arbórea no cerrado *stricto sensu* influenciou as relações entre a biomassa 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 biomassa deste tipo de vegetação (Tabela 1). Na imagem *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 em relação a uma imagem com média resolução espacial, como a *TM*. Além disso, a presença de sombra entre os estratos herbáceos e arbustivos típicos no cerrado *stricto sensu* podem também ter influenciado negativamente nas correlações entre a biomassa desta fisionomia e imagem com alta resolução.

De modo geral, foram obtidas melhores correlações entre os índices de vegetação e a biomassa de cerrado da EECa, em comparação com as bandas espectrais individuais. Entretanto, os resultados das relações entre os índices de vegetação e a biomassa ainda foram baixos, independentemente do sensor utilizado para calcular os índices (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Relações entre biomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e índices espectrais de vegetação.

	Cerrado <i>stricto sensu</i>		Biomassa				log Biomassa						
	a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b	
<i>QB</i>	SR	-14,99	9,25	0,443	9,587	0,239	0,059	0,26	10,65	0,515	1,093	0,931	0,026*
	DVI	-5,19	10,40	0,397	9,533	0,261	0,070	0,09	11,05	0,492	1,096	1,000	0,032*
	NDVI	29,99	8,80	0,481	9,361	0,103	0,041*	1,31	10,00	0,545	1,090	0,280	0,017*
	RDVI	-27,30	10,95	0,468	9,338	0,128	0,041*	-0,55	6,40	0,556	1,091	0,437	0,015*
	SAVI ¹	89,63	10,80	0,479	9,350	0,418	0,042*	1,77	8,55	0,560	1,091	0,130	0,015*
	SAVI ²	23,91	8,05	0,477	9,350	0,135	0,042*	1,29	9,85	0,560	1,091	0,488	0,015*
	SAVI ³	-14,92	9,80	0,476	9,350	0,075	0,042*	-0,01	9,45	0,561	1,091	0,101	0,015*
	SAVI2	70,79	12,10	0,344	9,827	0,276	0,107	1,32	11,05	0,429	1,101	0,756	0,057
	OSAVI	37,75	10,55	0,487	9,351	0,102	0,041*	0,85	7,25	0,549	1,090	0,278	0,017*
	MSAVI	-14,81	11,50	0,490	9,328	0,057	0,038*	0,20	12,65	0,555	1,090	0,057	0,016*
	TVI	1,48	10,05	0,200	10,810	0,372	0,257	-0,95	9,85	0,267	1,112	0,477	0,152
EVI	60,04	8,95	0,440	9,549	0,217	0,061	1,02	9,30	0,532	1,092	0,806	0,021*	
<i>TM</i>	SR	-14,38	10,05	0,333	8,894	0,164	0,048	-0,12	10,75	0,404	1,092	0,717	0,026
	DVI	-58,78	8,75	0,312	8,334	0,075	0,026*	-0,51	8,60	0,400	1,067	0,044*	0,001*
	NDVI	69,58	8,90	0,320	9,608	0,178	0,095	1,78	9,75	0,394	1,096	0,302	0,042*
	RDVI	-35,65	8,00	0,359	7,959	0,037	0,015*	0,47	11,85	0,451	1,090	0,180	0,016*
	SAVI ¹	36,73	10,35	0,321	9,581	0,174	0,093	1,01	9,75	0,397	1,096	0,293	0,040*
	SAVI ²	4,58	10,75	0,323	9,581	0,174	0,093	1,34	9,90	0,397	1,096	0,293	0,040*
	SAVI ³	22,07	10,15	0,324	9,553	0,169	0,090	0,78	8,45	0,392	1,095	0,284	0,039*
	SAVI2	-1367,06	10,60	0,334	8,894	0,051	0,048*	-23,26	9,45	0,405	1,092	0,030*	0,026*
	OSAVI	-97,78	9,50	0,154	10,844	0,644	0,409	-1,61	10,25	0,208	1,092	0,038*	0,002*
	MSAVI	-1442,4	9,50	0,331	8,894	0,051	0,048*	-2,65	10,95	0,408	1,092	0,030*	0,026*
	TVI	55,63	12,75	0,317	9,674	0,140	0,102	1,48	10,80	0,393	1,096	0,129	0,045*
EVI	12,55	11,10	0,257	10,075	0,453	0,171	0,67	10,60	0,327	1,104	0,699	0,123	

Onde: Índices de vegetação (SR= Simple Ratio; NDVI= Normalized Difference Vegetation Index; TVI= Transformed Vegetation Index; DVI= Difference Vegetation Index; SAVI= Soil Adjusted Vegetation Index (¹L= 0,25; ²L= 0,5; ³L= 1,); SAVI₂= Soil Adjusted Vegetation Index 2; MSAVI₂= Modified Soil Adjusted Vegetation Index; RDVI= Renormalized Difference Vegetation Index; OSAVI= Optimized Soil Adjusted Vegetation Index; EVI= Enhanced Vegetation Index). Abreviaturas na 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. 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.

Tabela 4. Relações entre biomassa aérea do cerradão e índices espectrais de vegetação.

Cerradão	Biomassa						log Biomassa						
	a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	B	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b	
QB	SR	4,01	10,40	0,277	18,633	0,837	0,222	0,84	10,10	0,257	1,043	0,002*	0,259
	DVI	-8,51	12,45	0,542	16,288	0,478	0,020*	0,66	9,10	0,522	1,038	0,000*	0,026*
	NDVI	-9,32	11,35	0,276	18,881	0,433	0,241	1,07	11,75	0,258	1,044	0,496	0,270
	RDVI	-7,97	10,50	0,496	16,795	0,231	0,032*	0,75	9,70	0,478	1,039	0,017*	0,040*
	SAVI ¹	117,74	11,25	0,481	16,976	0,692	0,038*	1,51	9,10	0,460	1,039	0,000*	0,047*
	SAVI ²	84,80	12,60	0,481	16,976	0,207	0,038*	1,10	9,05	0,461	1,039	0,059	0,047*
	SAVI ³	-54,43	10,80	0,484	16,976	0,093	0,038*	0,46	10,60	0,463	1,039	0,964	0,047*
	SAVI ₂	94,38	12,50	0,559	16,112	0,278	0,016*	1,64	9,00	0,535	1,037	0,000*	0,019*
	OSAVI	147,66	9,95	0,288	18,807	0,416	0,226	1,18	9,20	0,266	1,043	0,496	0,254
	MSAVI	-88,92	10,85	0,288	18,837	0,292	0,229	0,49	9,90	0,270	1,043	0,651	0,255
	TVI	-122,78	10,00	0,592	15,574	0,036*	0,008*	0,53	9,85	0,570	1,036	0,709	0,010*
EVI	183,52	11,50	0,521	16,513	0,338	0,024*	1,80	10,20	0,498	1,038	0,000*	0,031*	
TM	SR	26,06	10,25	0,531	17,445	0,587	0,025*	0,87	8,70	0,501	1,040	0,000*	0,034*
	DVI	15,33	9,60	0,538	17,065	0,893	0,032*	0,73	10,95	0,512	1,039	0,000*	0,037*
	NDVI	91,59	11,35	0,516	17,843	0,201	0,037*	1,14	10,30	0,483	1,040	0,052	0,046*
	RDVI	3,40	11,55	0,543	16,899	0,366	0,023*	0,88	11,85	0,517	1,039	0,000*	0,031*
	SAVI ¹	69,97	12,10	0,518	17,813	0,201	0,036*	1,09	11,00	0,483	1,040	0,048*	0,045*
	SAVI ²	72,18	14,30	0,517	17,813	0,201	0,036*	1,10	9,80	0,483	1,040	0,048*	0,045*
	SAVI ³	65,95	9,50	0,519	17,784	0,201	0,035*	1,04	10,10	0,486	1,040	0,045*	0,045*
	SAVI ₂	-2005,14	11,15	0,534	17,445	0,029*	0,025*	-2,13	7,30	0,501	1,040	0,065	0,034*
	OSAVI	-11,00	10,10	0,473	17,095	0,507	0,053	0,77	7,50	0,458	1,040	0,001*	0,064
	MSAVI	-1074,11	9,40	0,531	17,445	0,029*	0,025*	-3,93	12,25	0,500	1,040	0,065	0,034*
	TVI	152,82	11,00	0,514	17,887	0,096	0,039*	1,44	9,10	0,481	1,040	0,985	0,049*
EVI	45,73	10,65	0,448	18,844	0,718	0,089	0,98	10,20	0,416	1,042	0,000*	0,101	

Abreviaturas nas tabelas 1 e 3.

A transformação dos dados *QB* e *TM* por análises de componentes principais também gerou correlações fracas a moderadas com a biomassa do cerradão da EECA (Tabelas 5 e 6). No entanto, as correlações foram levemente superiores às outras transformações espectrais das imagens *QB* e *TM*. A *CP*₂/*TM* apresentou a melhor correlação com o logaritmo da biomassa do cerradão *stricto sensu* e a *CP*₁/*QB* obteve a melhor correlação com a biomassa do cerradão (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Relações entre biomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e componentes principais das imagens *QuickBird* ou *TM/Landsat*.

Cerrado <i>stricto sensu</i>		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	CP1	15,76	10,70	0,199	10,839	0,537	0,266	-0,12	10,20	0,266	1,112	0,900	0,165
	CP2	55,11	11,15	-0,499	8,852	0,005*	0,021*	1,51	13,30	-0,585	1,087	0,000*	0,008*
	CP3	-57,74	8,00	0,310	7,841	0,018*	0,005*	-0,12	12,20	0,357	1,090	0,331	0,014*
	CP4	22,61	11,85	-0,247	10,781	0,129	0,364	0,92	10,35	-0,262	1,108	0,007*	0,331
<i>TM</i>	CP1	55,03	11,50	-0,315	10,385	0,157	0,225	3,53	11,00	-0,321	1,106	0,058	0,192
	CP2	-106,17	9,75	0,594	7,787	0,016*	0,006*	-0,75	9,40	0,686	1,081	0,036*	0,002*
	CP3	0,68	9,85	0,327	10,883	0,710	0,203	1,18	10,10	0,329	1,107	0,136	0,192
	CP4	22,99	10,20	-0,413	9,657	0,006*	0,048*	1,13	9,15	-0,446	1,096	0,000*	0,031*
	CP5	-33,82	11,30	0,269	10,369	0,904	0,274	0,56	10,05	0,276	1,108	0,086	0,277
	CP6	15,46	10,65	-0,090	10,173	0,011*	0,229	0,93	8,80	-0,133	1,113	0,000*	0,425

Onde: CP= Componentes principais; Abreviaturas na Tabela 1.

Tabela 6. Relações entre biomassa aérea do cerradão e componentes principais das imagens *QuickBird* ou *TM/Landsat*.

Cerradão		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	CP1	-27,94	10,40	0,601	15,477	0,181	0,008*	0,53	10,05	0,574	1,036	0,000*	0,010*
	CP2	101,18	11,75	-0,437	17,352	0,003*	0,063	2,05	11,45	-0,424	1,041	0,000*	0,080
	CP3	-14,79	10,25	0,343	18,638	0,949	0,178	0,88	8,50	0,347	1,044	0,000*	0,194
	CP4	20,96	12,05	0,050	19,172	0,696	0,550	1,21	10,40	0,058	1,045	0,001*	0,640
<i>TM</i>	CP1	-126,04	7,95	0,471	16,383	0,133	0,040*	0,14	12,75	0,465	1,038	0,485	0,049*
	CP2	-69,48	10,95	0,427	18,150	0,340	0,089	0,42	9,60	0,397	1,042	0,062	0,113
	CP3	78,82	9,35	-0,599	16,187	0,000*	0,013*	1,19	10,75	-0,575	1,037	0,000*	0,017*
	CP4	146,71	10,20	-0,568	16,444	0,000*	0,024*	1,16	9,40	-0,557	1,039	0,000*	0,034*
	CP5	14,69	10,90	0,279	19,456	0,388	0,319	0,77	9,90	0,259	1,045	0,000*	0,352
	CP6	18,73	11,60	0,009	19,769	0,001*	0,982	0,87	10,75	0,022	1,046	0,000*	0,983

Abreviaturas nas Tabelas 1 e 4.

Para estimar a biomassa aérea das duas fitofisionomias de cerrado da EECA, o modelo linear de mistura espectral, calculado a partir de imagens *QB* e *TM* (Tabelas 7 e 8), não obteve resultados superiores aos encontrados pelos índices de vegetação ou componentes principais.

Tabela 7. Relações entre biomassa aérea do cerrado *stricto sensu* e imagens fração do modelo linear de mistura espectral, aplicado aos dados *QuickBird* e *TM/Landsat*.

Cerrado <i>stricto sensu</i>		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	IfSI	-61,99	10,80	-0,387	10,308	0,000*	0,126	-0,59	11,50	-0,425	1,096	0,000*	0,055
	IfV	34,27	9,20	0,491	8,240	0,158	0,010*	1,05	11,45	0,579	1,083	0,284	0,005*
	IfSo	-5,97	9,35	-0,060	11,103	0,188	0,763	0,59	8,15	-0,121	1,114	0,002*	0,604
<i>TM</i>	IfSI	-	10,90	-0,586	8,762	0,000*	0,013*	-1,39	11,10	-0,650	1,087	0,000*	0,005*
	IfV	46,35	8,40	0,480	7,234	0,034*	0,008*	2,07	9,70	0,573	1,084	0,224	0,004*
	IfSo	37,58	9,75	0,327	10,526	0,208	0,173	1,07	13,10	0,354	1,110	0,000*	0,159

Onde: Modelo linear de mistura espectral (IfSI= Imagem fração solo; IfV= Imagem fração vegetação; IfSo= Imagem fração sombra); Abreviaturas na Tabela 1.

Tabela 8. Relações entre biomassa aérea do cerradão e imagens fração, geradas com o modelo linear de mistura espectral, aplicado aos dados *QuickBird* e *TM/Landsat*.

Cerradão		Biomassa						log Biomassa					
		a	b	r _m	EMQ	p-a	p-b	a	b	r _m	EMQ ¹	p-a	p-b
<i>QB</i>	IfSI	193,02	9,05	0,079	19,655	0,000*	0,640	-1,25	13,10	0,065	1,046	0,000*	0,683
	IfV	74,87	10,30	0,455	17,261	0,630	0,054	1,25	10,60	0,442	1,040	0,000*	0,067
	IfSo	-4,76	9,55	-0,640	14,606	0,000*	0,003*	0,62	11,75	-0,607	1,033	0,000*	0,004*
<i>TM</i>	IfSI	66,56	12,60	0,085	19,126	0,004*	0,572	1,45	8,75	0,110	1,044	0,000*	0,587
	IfV	89,86	12,10	0,494	17,451	0,866	0,048*	1,24	9,75	0,468	1,040	0,000*	0,064
	IfSo	-4,59	9,85	-0,606	15,762	0,000*	0,012*	0,51	11,55	-0,591	1,036	0,000*	0,015*

Abreviaturas nas Tabelas 1 e 7.

4. Conclusões

As bandas espectrais dos sensores *QuickBird* ou *TM/Landsat*, quando utilizadas individualmente, apresentam correlações fracas a moderadas na estimativa da biomassa aérea do cerrado *lato sensu*. Contudo, algumas correlações foram altamente significativas a 5% de probabilidade, demonstrando que há associação entre as variáveis analisadas. A melhor estimativa da biomassa aérea do cerrado *stricto sensu* é obtida quando se utiliza a segunda principal componente (CP₂) gerada a partir das bandas espectrais *TM/Landsat* como variável independente. Para estimar a biomassa aérea do cerrado, a melhor estimativa é obtida a partir da primeira principal componente (CP₁) gerada com imagens *QuickBird*.

Entre as principais explicações para as correlações encontradas neste estudo, destaca-se a alta resolução espacial das imagens *QuickBird* (2,4 m), uma vez que permite ressaltar as sombras dos indivíduos e do arranjo espacial e estrutural do cerrado, aumentando a variância das reflectâncias. Além disso, avalia-se que a grande complexidade estrutural do cerrado, quando analisada com imagens de alta resolução espacial e uma resolução espectral relativamente pobre (4 bandas multiespectrais), não permite modelar adequadamente as relações entre a biomassa calculada em campo e dados multiespectrais. Já as imagens *TM/Landsat* com a média resolução espacial minimizam os efeitos das sombras, apresentando resultados levemente superiores.

O modelo linear de mistura espectral, quando comparado com as outras transformações espectrais das imagens, não apresentou resultados superiores na predição da biomassa 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 biomassa 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 biomassa do cerrado, recomenda-se o uso destas técnicas como opção ao MLME.

O comprometimento com a sustentabilidade de florestas e com a redução das emissões de gases do efeito estufa, em âmbito nacional e internacional tem aumentado o interesse em estimativas e mapeamentos precisos de biomassa. Ainda que imagens de sensores eletro-ópticos orbitais possuam limitações para estimar a biomassa de fitofisionomias do cerrado, dados do satélite *TM/Landsat* podem subsidiar estes estudos por permitirem a classificação e estratificação da paisagem de áreas extensas, auxiliando em inventários florestais. Por outro lado, dados do satélite *QuickBird* possibilitam mapear áreas menores, com grande detalhe, permitindo muitas vezes identificar copas de árvores ou pequenas alterações na vegetação, como corte seletivo, árvores caídas, etc.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Rodrigues da ESALQ/USP por disponibilizar os dados de vegetação de cerrado da parcela permanente (Projeto BIOTA/FAPESP 1999/09635-0) na Estação Ecológica de Assis, bem com a imagem *QuickBird* utilizada neste estudo. Ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo suporte oferecido ao desenvolvimento da pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Abdala, G.C. Caldas, L.S., Haridasan, M., Eiten, G. Above and belowground organic mater and root: shoot ratio in a cerrado in Central. **Brazilian Journal of Ecology**, v. 2, p. 11-23, 1998.
- 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. 129p. (INPE-7253-TDI/696). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- 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.

Bitencourt, M D. et al. Cerrado vegetation study using optical and radar remote sensing: two Brazilian case studies. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 33, n.6, p. 468-480, 2007.

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.; Read, J.M.; Clark, M.L.; Cruz, A.M.; Dotti, M.F.; Clark, D. 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.

Durigan, G. et al. Inventário florístico do cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP. **Hoehnea**, v. 26, p. 149-172, 1999.

Durigan, G. Observations on the southern cerrados and their relationship with the core are. In: Pennington R.T.; Lewis, G.P.; Ratter, J.A. (ed.) **Neotropical savannas and seasonally dry forests: plant diversity, biogeography and conservation**. Taylor & Francis, p.67-77. 2006.

Efron, B. **The Jackknife, the Bootstrap and other resampling plans**. Society for industrial and applied mathematics, 1982. 92 p.

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, 3, p. 425-447, 2004.

Foody, G.M.; Boyd, D.S.; Cutler, M.E.J. 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.

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.

Kuntschik, G.; Bitencourt, M.D. Quantificação de fitomassa florestal aérea de cerrado e cerradão através de imagens orbitais SAR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 2201-2208. CD-ROM.

Leboeuf, A.; Beaudoin, A.; Fournier, R.A.; Guindon, L.; Luther, J.E.; Lambert, M.C. 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.; Mausel, P.; Brondízio, E.; Moran, E. 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. Ramos Neto, M.B.; Pereira, P.G.P.; Caldas, E.F.; Gonçalves, D.A.; Santos, N.S.; Tabor, K.; Steininger, M. **Estimativas de perda de área de Cerrado brasileiro**. Brasília: Conservação Internacional, 2004. 23 p. (Relatório técnico não publicado).

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.; Mittermeier, R.A.; Mittermeier, C.G.; Fonseca, G.A.B.; Kents, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.

Pinheiro, E.S.; Durigan, G.; Santos, J.R. Avaliação de imagens QuickBird para estimativa de fitomassa aérea do cerrado. **Ambiência**. v.4. Edição Especial. 2008 p.69-83.

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, p. 157-199.

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: 2002. 126p. (Relatório Científico I - FAPESP 1999/09635-0). Disponível em: <http://www.lerf.esalq.usp.br/parcelas/> Acessado em: 04 dez., 2005.

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.; Watzlawick, L.F.; Balbinot, R.; Ziliotto, M.A.; Gomes, F.S. **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. 156p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1988.

Sprugel, D.G. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. **Ecology**, 64, p. 209-210, 1983.

Willmott, C.J. Davis, R.E.; Feddema, J.J.; Klink, K.M.; Legates, D.R.; Rowe, C.M.; Ackleson, S.G.; O'donnell, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 12, p. 8995-9005, 1985.