

Geobotânica por sensoriamento remoto como ferramenta no mapeamento geológico de área de floresta amazônica, uma aplicação na região de Apuí - Nova Aripuanã (AM)

Mônica Mazzini Perrotta¹
Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida²
Carlos Roberto de Souza Filho³
Ruy Benedito Calliari Bahia¹
Ulisses Antonio Pinheiro da Costa¹
Fabio Splendor¹
Nelson Joaquim Reis¹
Leandro Menezes Betiollo¹

¹ CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Diretoria de Geologia e Recursos Minerais - DGM
Avenida SGAN - Quadra 603 – Conjunto J, Parte A – 1º andar – Brasília - DF, Brasil
perrotta@sp.cprm.gov.br, ruybahia@pv.cprm.gov.br,
{ucosta, fsplendor, reis, lbetiollo}@ma.cprm.gov.br

² Universidade de São Paulo – USP - Instituto de Geociências (IGc)
Rua do Lago, 562 – 05508-800 - São Paulo – SP, Brasil
talmeida@usp.br

³ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Instituto de Geociências (IG)
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas – SP, Brasil
beto@ige.unicamp.br

Abstract. This paper evaluates a geobotany enhancement technique applied to multispectral VNIR and SWIR data from ASTER imagery. The aim is to map the geology of a virtually inaccessible area, covered by tropical rainforest, and for which no airborne geophysical data are available. The technique is based on the premise that the vegetation characteristics and distribution are influenced by the underlying bedrock, and its spectral response can reveal the lithologic arrangement. The technique is straightforward and comprises band ratios using a fixed near infrared band on the numerator and individual visible and shortwave infrared bands on the denominator. These band ratios were subsequently submitted to principal component analysis (PCA) in order to segregate noise, to decorrelate possible redundant information and to concentrate the information of interest into some specific principal components. The high frequency information produced was smoothed by low pass filtering. Statistical analysis of PCA results and visual check of the filtered components individually (and in false colour composites) allowed the selection of the best RGB triplets. These were sharpened by the first principal component of the original VNIR ASTER bands through an IHS transform, in order to add albedo/texture information - lost through band rationing - back to the imagery. The interpretation of the products shows a plausible coherence with field observations and existing small-scale maps, demonstrating that the proposed processing strategy can provide useful geologic information in inaccessible vegetated areas.

Palavras-chave: multispectral remote sensing, geobotany, geology, ASTER sensor, sensoriamento remoto multispectral, geobotânica, geologia, floresta tropical, sensor ASTER.

1. Introdução

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de prover produtos de sensoriamento remoto multispectral para o projeto de mapeamento geológico da Folha Sumaúma (1:250.000). Esta quadrícula, com 90% de sua área recoberta por floresta amazônica, não conta com dados aerogeofísicos de detalhe. Dados de radar fornecem boa base de interpretação estrutural, mas não favorecem a discriminação litológica. Assim, na busca da distinção entre os conjuntos litológicos presentes na área, a abordagem aqui implementada baseou-se em trabalho anterior (Perrotta et al., 2008), em que a aplicação de técnica de realce espectral da vegetação em dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) mostrou a correlação da variação da cobertura vegetal com a variação litológica. Uma área a sudeste da folha Sumaúma foi selecionada para detalhamento neste trabalho - sua

localização e geologia na escala ao milionésimo (CPRM, 2006) encontram-se ilustradas na Figura 1.

Exemplos de estudos de espectroscopia e sensoriamento remoto que abordam o comportamento da vegetação nas regiões do visível (VIS) e infravermelho refletido (NIR e SWIR) do espectro eletromagnético podem ser encontrados em Peterson et al. (1988), Curran (1989), Zagolski et al. (1996), Fourty e Baret (1998), Asner (1998), entre outros. Com base nestes estudos, o comportamento espectral da vegetação relativo à resolução espectral do sensor ASTER pode ser assim sumarizado: B1 e B2 (VIS), faixa de absorção por pigmentos foliares, respectivamente antocianina e clorofila; B3 (NIR), região do espectro em que a radiação eletromagnética é fortemente refletida pela estrutura foliar e pigmentos transparentes; B4 a B9 (SWIR), domínio da água na estrutura foliar com máximos de reflectância em 1,65 μm (B4) e 2,20 μm (B6) e feições de absorção ligadas a compostos bioquímicos tais como amido (B5, B6 e B7), celulose (B7), lignina, proteínas e açúcares (B8).

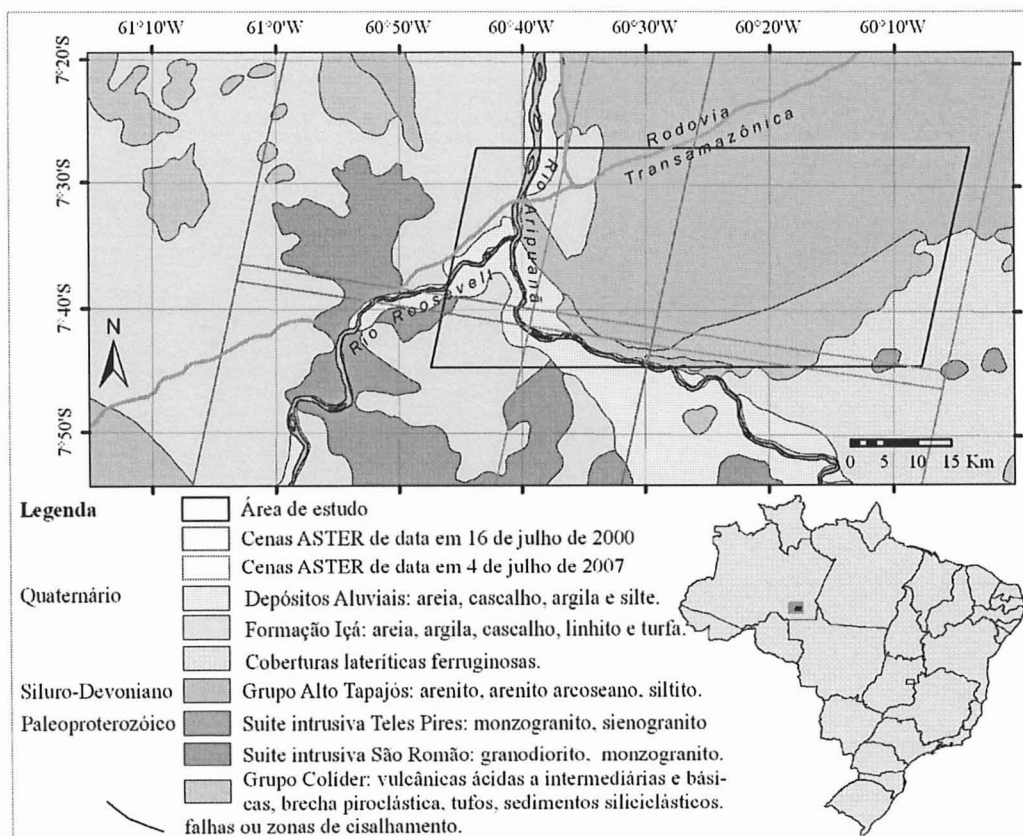


Figura 1. Extrato do mapa geológico do Estado do Amazonas (CPRM, 2006) com localização da área deste estudo e limites das cenas ASTER utilizadas. No mapa do Brasil, localização da Folha Sumaúma 1:250.000 (em magenta) e área de estudo em preto.

2. Fontes dos Dados e Método de Trabalho

Os dados multiespectrais de sensoriamento remoto utilizados foram extraídos de quatro cenas ASTER (Figura 1) de passagens em 16/7/2000 e 4/7/2007. Delas foram selecionadas as três bandas do VIS e NIR (VNIR) (resolução espacial de 15 m, espectralmente centradas em B1 - 0,556 μm , B2 - 0,661 μm e B3 - 0,807 μm), e as seis bandas do SWIR (resolução espacial de 30 m, centradas em B4 - 1,656 μm , B5 - 2,167 μm , B6 - 2,209 μm , B7 - 2,262 μm , B8 - 2,336 μm e B9 - 2,400 μm). Constam dos dados geológicos as informações de afloramentos dos projetos Aripuanã-Sucunduri e Tapajós-Sucunduri (CPRM, 1972, 1978 in: Bahia e

Oliveira, 2004), a cartografia geológica da Folha Purus (Bahia e Oliveira, 2004), do mapa do Estado do Amazonas (CPRM, 2006) e dados inéditos obtidos no Projeto Sumaúma.

O pré-processamento das imagens ASTER envolveu os seguintes procedimentos: (i) correção do efeito de *cross-talk*, através do programa CRSTK30 (ERSDAC, 2006); (ii) ortorretificação das cenas, utilizando-se o modelo digital de terreno extraído diretamente das bandas 3N e 3B (este procedimento feito anteriormente ao processamento não causa alterações significativas nos produtos finais, assim como verificado em Perrotta et al., 2008); (iii) agrupamento das bandas do espectro refletido num único arquivo, com reamostragem por interpolação bilinear das bandas do VNIR para a resolução de 30 m, compatível com a resolução das bandas do SWIR e com a escala de trabalho - 1:250.000; (iv) mosaicos das duas cenas de cada passagem e recorte da área de interesse (os mosaicos de cenas serão referenciados neste trabalho como 16jul2000 e 4jul2007); (v) compensação atmosférica dos dados, por modelo de transferência radiativa MODTRAN (*Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm*), complementando-se os parâmetros atmosféricos com dados de cena de mesma passagem do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o que eleva a acurácia da correção; (vi) criação de uma máscara de processamento considerando apenas as áreas de vegetação original preservada. Este último procedimento é essencial já que o realce da resposta espectral da vegetação é baseado em análise de principais componentes (APC). Nesse caso, os resultados são controlados pelas variâncias das bandas e covariâncias ou correlações entre pares de bandas, que se tornam distintos na presença de alvos que não sejam relacionados à vegetação original preservada.

A técnica para realce espectral da vegetação aplicada foi adaptada de Almeida e Souza Filho (2004), conforme o proposto em Perrotta et al. (2008), e consistiu de: (vii) razão de bandas, usando-se como referência a banda do NIR (B3) fixa no numerador, dividida por cada uma das demais, resultando num conjunto de oito razões; (viii) análise de principais componentes (APC) do conjunto de razões de bandas, com a finalidade de segregação de ruído, decorrelação da informação redundante e concentração da informação de interesse em algumas principais componentes (PCs) específicas; (ix) análise dos resultados estatísticos da APC e avaliação visual das PCs para se determinar as mais representativas das variações espectrais realçadas nas razões; (x) aplicação de filtro de convolução do tipo passa-baixa (proporcional de 17 elementos) sobre as PCs, com o objetivo de suavização das feições de alta frequência que estão relacionadas a variações florísticas locais, sem significado geobotânico; (xi) seleção das PCs suavizadas para compor composições coloridas RGB (este procedimento ocasionalmente envolve a inversão de alguma componente); (xii) introdução nos tripletes RGB de imagem extraída da primeira componente de APC sobre as bandas do VNIR, que representa o albedo e feições texturais perdidas na razão de bandas (é feita através de fusão, por processamento do tipo IHS, com tripletes já contrastados).

3. Resultados e Discussão

Considerando a variação estatística da reflectância da vegetação nas bandas ASTER, após a compensação atmosférica (Tabela 1), nota-se que seguindo a evidente maior variância na B3, a mais significativa ocorre na B4, denotando que depois do NIR, é esta região do SWIR (sensível às variações de água na estrutura foliar) a mais discriminante da vegetação. É também entre estas bandas que se tem a maior covariância: a banda B4 apresenta o maior valor de correlação com a banda B3, assim como com qualquer uma das demais bandas ASTER.

A variação estatística nos conjuntos de razões (Tabela 1) e as matrizes de variância-covariância (var-cov) (Tabela 2) revelam a maior variância na razão 3/2 e a menor na razão 3/4 (notadamente mais baixa que as demais). Isso indica uma possível perda de informação nesta razão quando comparada com a variância de B4. Por outro lado, os coeficientes de

correlação entre razões que envolvem o SWIR (Tabela 2), inclusive 3/4, são altos, mas a razão 3/9 tem comportamento estatístico distinto das razões 3/5 a 3/8. São altas as correlações entre as razões 3/1 e 3/2 e relativamente baixas as que comparam o VIS e o SWIR.

O contraste entre as matrizes de var-cov e de correlação (Tabela 2) predizem resultados bastante distintos na APC se os autovalores forem calculados com base em uma ou em outra. A APC com autovalores medidos com base na matriz de correlação (unidades normalizadas de variância) é mais recomendada, principalmente se as escalas de medida das variáveis não são comparáveis (e.g. Jolliffe, 2002). Números digitais em bandas espectrais podem não estar associados à mesma grandeza física, mas se os dados são convertidos em unidades de radiância ou reflectância, a normalização pode ser indesejável, pois removeria os efeitos de alterações na variabilidade entre bandas (Mather, 1987).

Tabela 1. Dados sobre a variação estatística da reflectância da vegetação na resolução espectral do sensor ASTER e nas razões de bandas, considerando-se apenas pixels de vegetação (B = banda, R = razão, Med= média, Var = variância).

16jul2000						4jul2007					
B	Med	Var	R	Med	Var	B	Med	Var	R	Med	Var
1	391,7	969	3/1	7,50	0,26	1	438,1	2465	3/1	6,65	0,45
2	236,9	534	3/2	12,44	1,41	2	245,0	1418	3/2	12,02	3,24
3	2931,5	43787				3	2896,1	98944			
4	1484,3	7643	3/4	1,98	0,01	4	1404,4	9296	3/4	2,06	0,03
5	564,9	1198	3/5	5,20	0,13	5	541,8	2300	3/5	5,37	0,39
6	590,3	1421	3/6	4,97	0,11	6	571,2	2562	3/6	5,09	0,32
7	554,9	1451	3/7	5,29	0,15	7	520,4	2311	3/7	5,59	0,41
8	424,8	1073	3/8	6,92	0,29	8	427,0	2165	3/8	6,84	0,77
9	610,5	3773	3/9	4,83	0,24	9	558,6	5730	3/9	5,27	0,71

Tabela 2. Matrizes de variância/covariância (diagonais inferiores em negrito) e de correlação (diagonais superiores em itálico) dos conjuntos de razões de bandas (R) (pixels de vegetação).

R	16jul2000								4jul2007							
	3/1	3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/1	3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9
3/1	,26	<i>,90</i>	<i>,45</i>	<i>,49</i>	<i>,53</i>	<i>,53</i>	<i>,54</i>	<i>,42</i>	,45	<i>,84</i>	<i>,50</i>	<i>,49</i>	<i>,48</i>	<i>,46</i>	<i>,43</i>	<i>,32</i>
3/2	,54	1,41	<i>,51</i>	<i>,56</i>	<i>,59</i>	<i>,58</i>	<i>,59</i>	<i>,46</i>	1,01	3,24	<i>,48</i>	<i>,48</i>	<i>,48</i>	<i>,46</i>	<i>,44</i>	<i>,33</i>
3/4	,02	,06	,01	<i>,81</i>	<i>,87</i>	<i>,79</i>	<i>,77</i>	<i>,48</i>	,06	,16	,03	<i>,82</i>	<i>,84</i>	<i>,81</i>	<i>,73</i>	<i>,55</i>
3/5	,09	,24	,03	,13	<i>,85</i>	<i>,80</i>	<i>,79</i>	<i>,64</i>	,20	,53	,09	,39	<i>,75</i>	<i>,73</i>	<i>,67</i>	<i>,54</i>
3/6	,09	,23	,03	,10	,11	<i>,84</i>	<i>,83</i>	<i>,63</i>	,18	,49	,09	,27	,32	<i>,75</i>	<i>,69</i>	<i>,55</i>
3/7	,10	,26	,03	,11	,11	,15	<i>,81</i>	<i>,62</i>	,20	,53	,10	,29	,27	,41	<i>,67</i>	<i>,53</i>
3/8	,15	,38	,04	,15	,15	,17	,29	<i>,69</i>	,25	,70	,12	,37	,34	,38	<i>,77</i>	<i>,52</i>
3/9	,10	,27	,02	,11	,10	,12	,18	,24	,18	,51	,09	,29	,26	,29	,39	,71

A APC sobre os dois conjuntos de razões de bandas baseada nas matrizes de correlação (Tabela 2) gerou as matrizes de autovetores da Tabela 3. Observa-se nestas matrizes, e nas PCs produzidas, que esta APC não foi capaz de segregar adequadamente a informação decorrente das diferentes porções do espectro eletromagnético, principalmente nas PCs sem efeitos consideráveis de ruído. Dessa forma, a PC1, que acumula 70% da variação, apresenta contribuição equitativa de todas as razões. Na PC2, que representa aproximadamente 15% da informação, predominam as contribuições das razões da B3 com as bandas do VIS. A contribuição da razão 3/4 é importante em uma das PCs de ordem mais alta (7 ou 8) em companhia da razão 3/6, mas com sinais trocados. Nos dois casos, as duas últimas PCs (que explicam 1 ou 2% da variação) apresentam coerência espacial e pouco efeito de ruído, ao contrário das PCs 3 a 6. Boa variação tonal foi obtida em RGB = PC1,-PC2, PC7 (16jul2007)

e RGB = PC1, -PC2, PC8 (04jul2000) (Figura 2A), que envolvem essencialmente a mesma informação espectral.

Tabela 3. Autovalores (AV) e autovetores resultantes da APC sobre os conjuntos de razões de bandas com base na matriz de correlação. Em itálico componentes dominadas por ruído.

PC	16jul2000									4jul2007								
	AV %	Autovetores (* 10 ²)								AV %	Autovetores (* 10 ²)							
		3/1	3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9		3/1	3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9
1	71	30	32	36	38	39	38	38	31	64	30	30	40	38	39	38	36	30
2	13	67	60	-25	-20	-19	-15	-14	-12	14	64	64	-18	-15	-16	-17	-17	-24
3	7	-3	-4	-45	-7	-17	-8	11	86	7	5	9	-21	-15	-16	-19	-10	92
4	3	1	-9	-16	-59	-11	59	47	-16	4	-2	4	-14	-24	-17	-26	91	-6
5	2	-2	3	21	-25	12	-68	64	-4	3	-2	4	-5	-62	-14	77	2	2
6	2	-2	-3	-48	62	-30	0	44	-31	3	3	-3	-10	55	-78	29	7	0
7	1	16	-13	55	7	-79	4	6	13	2	69	-68	17	-11	-7	-4	2	3
8	1	66	-71	-7	4	20	-6	-2	-1	2	-14	16	84	-24	-38	-21	-8	3

As APCs (a) desenvolvidas com base nas matrizes de var-cov (Tabela 2) resultaram nos autovalores e autovetores da Tabela 4. Nota-se que os resultados são praticamente idênticos entre os dois mosaicos. Neste caso a segregação da informação relativa às diversas regiões do espectro foi mais eficiente, mas várias componentes apresentaram efeitos de ruído, principalmente no caso do mosaico 4jul2007. A PC1 concentra a informação das razões 3/2 e 3/1, seguidas de 3/8. A PC2, ainda com contribuição de 3/2, é constituída do grupo de razões que envolvem o SWIR (exceto 3/4), mas no caso do mosaico 04jul2007 apresenta sutil efeito de ruído. As PCs 3, 4, 6 e 7 são francamente dominadas por ruído. A PC5 é construída principalmente de 3/1 seguida de 3/2, 3/7 e 3/8. A razão 3/4, dada sua baixa variância e covariância com as demais, é a principal constituinte da PC8, mas esta informação também foi prejudicada pelo ruído. Apesar da composição entre as PCs 1, 2 e 5 fornecer boa variação tonal, observou-se, construindo-se outros tripletes apesar do ruído, que informações importantes foram perdidas, principalmente a relativa à razão 3/4.

Tabela 4. Autovalores (AV) e autovetores das PCs (PCa) resultantes da APC sobre os conjuntos de razões de bandas baseada na matriz de var/cov. Em itálico componentes dominadas por ruído.

PCa	16jul2000										AV	4jul2007									
	AV %	Autovetores (*10 ²)										AV %	Autovetores (*10 ²)								
		3/1	3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/1			3/2	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9		
1a	77	33	82	05	18	17	20	28	21	68	28	83	06	20	18	20	27	21			
2a	14	19	43	-08	-32	-28	-33	-51	-47	18	10	47	-10	-31	-28	-32	-50	-48			
3a	4	04	03	-12	-22	-25	-29	-26	85	6	-03	06	-05	-15	-13	-17	-47	84			
4a	2	41	-16	-07	-43	-22	-29	69	-09	3	11	-07	09	42	30	48	-67	-14			
5a	1	81	-33	01	11	06	33	-33	04	2	89	-27	00	16	-03	-31	03	03			
6a	1	18	-07	04	63	16	-73	02	-03	2	32	-09	-02	-67	-14	65	03	03			
7a	1	-03	02	-13	46	-84	21	11	-04	1	01	-01	04	-43	86	-26	-05	-02			
8a	0	-01	00	-98	06	20	04	02	-05	0	-01	00	99	-08	-11	-07	-03	00			

Tentando-se obter componentes decorrelacionadas que representem as razões do SWIR independentemente, isolando-se ao máximo o ruído, novas APCs (b) foram processadas considerando-se apenas as razões que envolvem esta faixa do espectro (autovetores na Tabela 5). Observou-se, novamente, concentração significativa de toda informação do SWIR na PC1, exceto da razão 3/4, que igualmente compôs quase que exclusivamente a PC de mais alta

ordem, mas novamente acompanhada de ruído. A PC1(b) gerada neste procedimento tem qualidade superior à PC2(a) anterior, principalmente no caso do mosaico 4jul2007, com a vantagem de isolar a informação do SWIR, sem qualquer participação do VIS. As demais componentes, que poderiam segregar as razões do SWIR independentemente, são dominadas por ruído. Esse fato impediu a determinação de quais faixas desta porção do espectro, e conseqüentemente, quais compostos bioquímicos, seriam mais sensíveis à variação litológica. Uma terceira APC (c), com base nas matrizes de var-cov, foi aplicada no conjunto 3/1, 3/2, 3/4 (autovetores na Tabela 5), permitiu decorrelacionar estas três razões, gerando componentes sem efeitos perceptíveis de ruído.

Tabela 5. Autovetores ($\times 10^2$) gerados nas APCs sobre o conjunto das razões B3 com bandas do SWIR (PCb) e sobre o das razões B3 com B1, B2, B4 (PCc), com base na matriz de var-cov. Em *itálico* componentes dominadas por ruído.

PCb	16jul2000						4jul2007						PCc	16jul2000			4jul2007		
	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9		3/1	3/2	3/4	3/1	3/2	3/4
1b	10	37	35	40	59	47	12	39	35	40	57	48	1c	37	93	04	28	96	05
2b	12	20	24	27	23	-87	05	14	13	17	43	-87	2c	93	-37	-04	95	-28	10
3b	07	45	23	39	-76	10	-09	-41	-30	-47	70	14	3c	03	-06	100	-11	-02	99
4b	05	63	17	-76	03	-03	02	68	12	-72	-02	-02							
5b	-13	47	-84	21	11	-04	-04	43	-86	26	05	02							
6b	-98	06	20	04	02	-05	-99	08	11	07	03	00							

Diante destes resultados, composições coloridas foram selecionadas dentro de um conjunto de componentes formado por PC1a, PC2a, PC5a, PC1b, PC1c, PC2b e PC3c, considerando-se as regiões do espectro eletromagnético e possíveis compostos bioquímicos representados. Nota-se que as melhores composições são as que combinam informação das diferentes faixas do espectro. Entre os pares análogos, a PC1a (que acumula a maior variação de informação de todos os conjuntos, com predomínio de 3/2) se mostrou apenas ligeiramente mais discriminante que a PC1c. A PC1b, com aportes positivos das razões que englobam o SWIR, participa melhor nos tripletes quando é invertida, e proporciona resultados distintos, e melhores, das composições em que é substituída pela sua análoga (PC2a). De fato, essa PC é estatisticamente mais correlata à PC1a do que à PC2a, o que indica a importância das componentes de primeira ordem na tradução da variabilidade de todos os dados. A PC2a tem também maior correlação com a PC3c. Esta (única que representa 3/4) aparece na maioria das melhores composições obtidas considerando-se a variação tonal e discriminação litológica. Apesar de aparente prejuízo da informação geobotânica exposta na B4 em comparação com a razão 3/4, a PC3c tem a propriedade de realçar as transições entre os diferentes domínios tonais. O par PC3a-PC2c tem comportamento idêntico nas composições. Muitos tripletes gerados forneceram ótima variação de cores (cf. Figuras 2B e 2C), coerente com a distribuição litológica delineada nos mapas geológicos de pequena escala (Figura 1), e mostram potencial para detalhamento e subdivisão das unidades mapeadas compatível com a escala 1:250.000. Uma interpretação geológica, com base nas imagens produzidas e nos dados de campo, é apresentada na Figura 3. Ressalta-se que, diferente do resultado da APC baseada na matriz de correlação, no caso das PCs calculadas através das matrizes de cov-var, as composições produzidas para os dois mosaicos, combinando componentes que concentram as mesmas razões, apresentam clara continuidade e correspondência tonal (observe a Figura 2).

4. Conclusão

Exceto por pequenas variações estatísticas nas APCs, os resultados alcançados são muito semelhantes aos obtidos em Perrotta et al. (2008) para uma região no estado do Mato Grosso, analisada por meio de mesma técnica de realce espectral da vegetação. Esta observação,

aliada aos padrões semelhantes encontrados entre cenas distintas, remete a um modelo constante do comportamento espectral da vegetação, confirmando a consistência das relações geobotânicas, que podem ser detectadas dentro da resolução do sensor ASTER. Assim, reforçou-se neste estudo a competência da estratégia de processamento proposta no fornecimento de informações geológicas úteis às áreas de floresta tropical de difícil acesso.

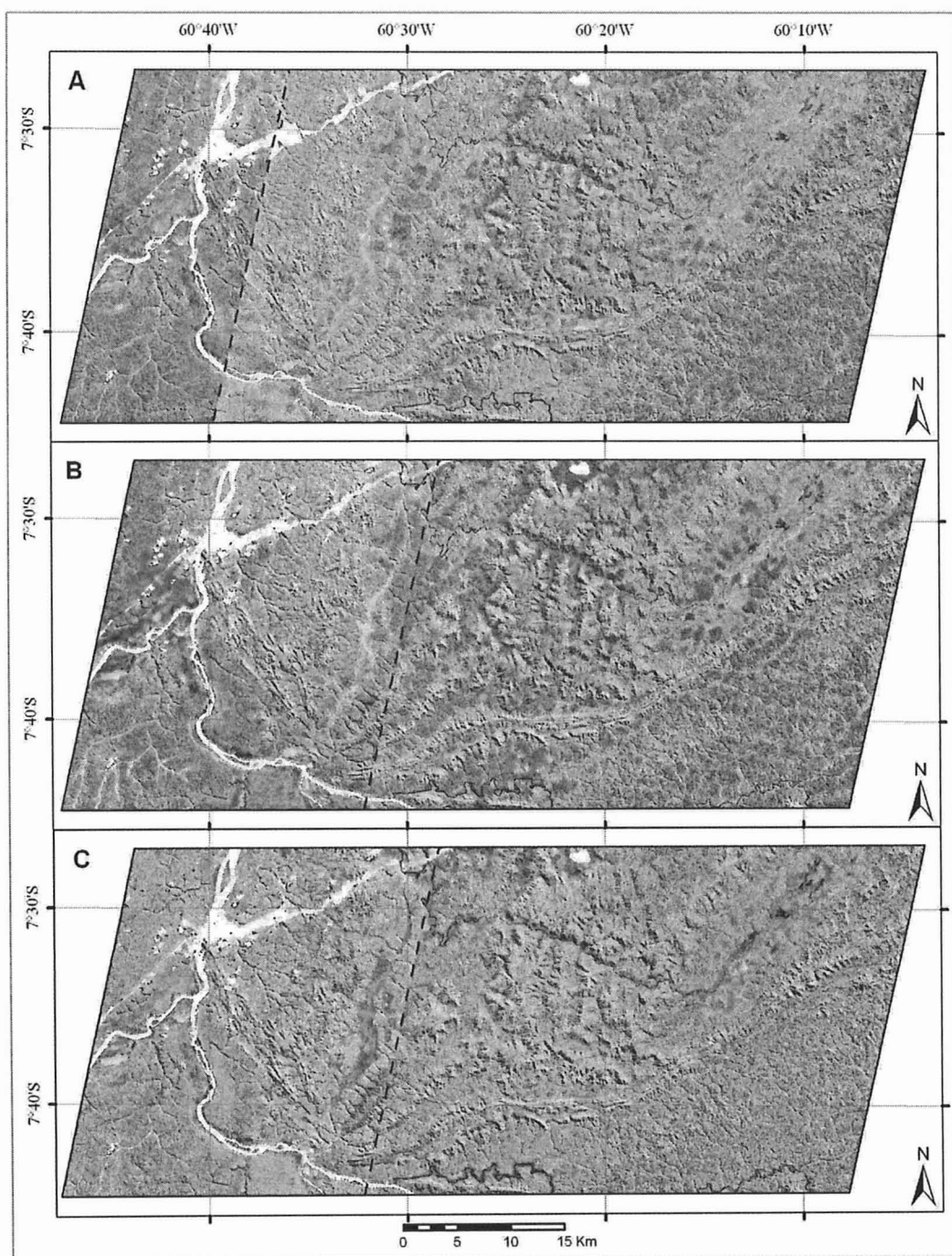


Figura 2. Composições coloridas RGB combinando PCs, derivadas das APCs sobre as razões de bandas, após filtragem passa-baixa e introdução de imagem de albedo. A. Resultado da APC baseada na matriz de correlação (16jul2000: PC1,-PC2,PC7; 4jul2007: PC1,-PC2, PC8). B, C. Resultados das APCs baseadas nas matrizes de covariância. B. (PC1a, PC3c, -PC1b). C. (PC3c, PC2c, -PC1b). Em tracejado o limite entre os mosaicos 16jul2000 e 4jul2007.

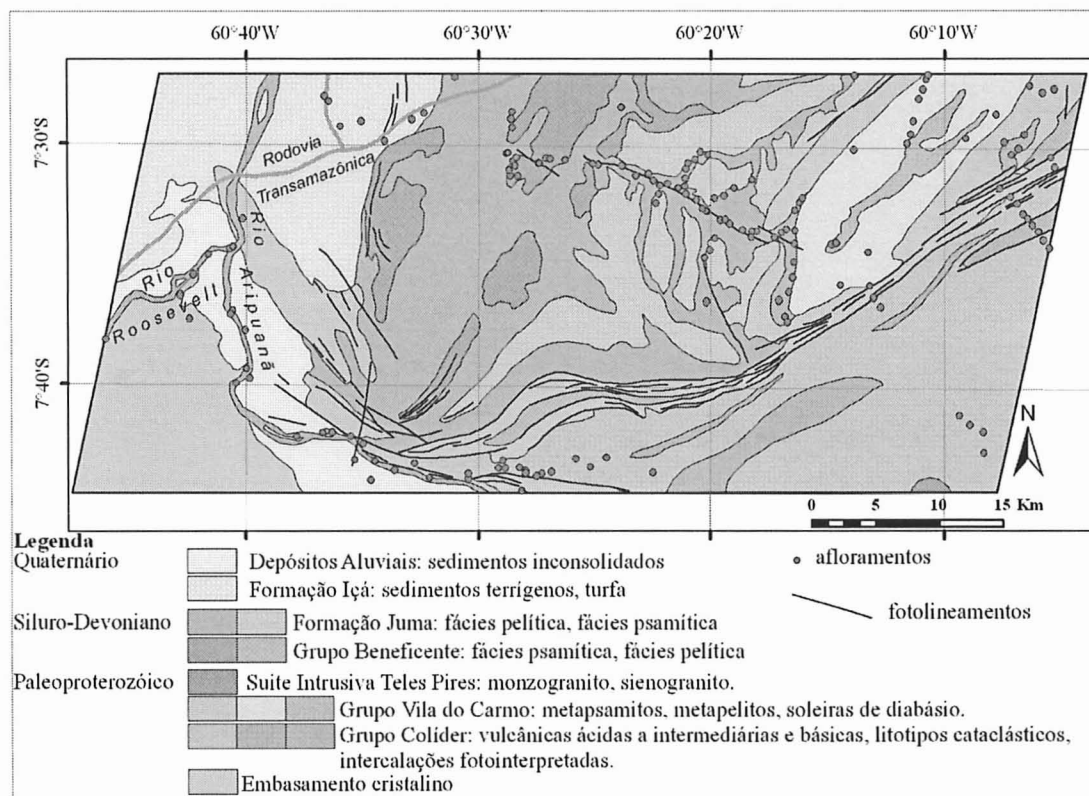


Figura 3. Interpretação geológica baseada nas imagens produzidas e dados de campo.

5. Referências

- Almeida, T.I.R.; Souza Filho, C.R. Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 22, p. 5005-5023, 2004.
- Asner, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v. 64, n. 3, p. 234-253, 1998.
- Bahia R.B.C.; Oliveira M.A. Folha SB.20-Purus. In: C. Schobbenhaus et al. (eds.). *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas - SIG. Programa Geologia do Brasil*. Brasília: CPRM, CDROM, 2004.
- CPRM (Cia de Pesquisa de Recursos Minerais). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Escala 1:1000.000. Mapa Geológico do Estado do Amazonas*. Manaus: MME. CD-ROM e Texto, 2006. 125p.
- Curran, P.J. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, v. 30, n. 3, p.271-278, 1989.
- ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). *Aster product guide*. 2006. Disponível em: <www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/release_e/set_release_ecrs.html> Acesso em 2 jul. 2007.
- Fourty, T.; Baret, F. On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, n. 7, 1283-1297, 1998.
- Jolliffe, I.T. *Principal Component Analysis*, 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 2002. 528p.
- Mather, P.M. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images, an Introduction*. Chichester: John Wiley & Sons, 1987. 352 p.
- Peterson, D.L.; Aber, J.D.; Matson, P. A.; Card, D H.; Swanberg, N.; Wessman, C.; Spanner, M. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. *Remote Sensing of Environment*, v.24, n. 1, p. 85-108, 1988.
- Perrotta, M.M.; Almeida, T.I.R.; Andrade, J.B.F; Souza Filho, C.R.; Rizzotto, G.; Santos, M.G.M. Geobotânica por sensoriamento remoto e aerogamaespectrometria aplicados ao mapeamento geológico da Amazônia: um estudo comparativo no vale do Guaporé (MT). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 155-168, 2008.
- Zagolski, F.; Pinel, V.; Romier, J.; Alcayde, D.; Fontanaru, J.; Gastellu-Etchegorry, J.P.; Giordano, G.; Marty, G.; Mougin, E.; Joffre, R. Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 6, p. 1107-1128, 1996.