

Detecção de minerais em áreas de degradação de terras utilizando dados do Infravermelho de Ondas Curtas (*Short Wave Infrared*) e Infravermelho Termal (*Thermal Infrared*) do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

Luiz Eduardo Vicente¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/IGE/DGRN
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{vicente, beto}@ige.unicamp.br

Abstract: In this work ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) Short Wave Infrared (SWIR - 5 to 9 bands - 1.60 to 2.43 μm) and Thermal Infrared (TIR - 10 to 14 bands - 8.125-10.95 μm) data were used to map mineral components in land degradation areas. The control tracts are located in the SW terrains of the Rio Grande do Sul State, Brasil. The area presents a specific land degradation process named *arenização*, which is connected to erosion of sand-rich rocks and structuring of sandy soils. This process imposes several environmental damages, such as amplification of erosion, shrinking of soils fertility and decline of farming. Using ASTER-SWIR/TIR data it was possible to identify diagnostic absorption features related to OH-bearing (clay) minerals, and Si-O-bearing minerals. Mineral maps were produced using the Decorrelation Stretch method. Results show that ASTER-TIR data allowed the mapping of mineral abundances on the soil, including mixtures of quartz, clay minerals and others land cover types. Areas mapped as simultaneously quartz-rich and poor in clays minerals are dominated by sandy soils, sparse vegetation cover and are marked by large nutrient losses due to excessive drainage and leaching. This approach allows a semi-quantitative and more precise mapping considering the dynamics of land degradation processes.

Palavras-chave: ASTER, Thermal Infrared, Short Wave Infrared, land degradation, remote sensing, ASTER, Infravermelho Termal, Infravermelho de ondas curtas, degradação de terras, sensoriamento remoto.

1. Introdução

O uso do sensor ASTER para o mapeamento ambiental e de recursos naturais tem gerado uma série de bons resultados desde sua operacionalização em 1999. Porém, a maioria dos resultados obtidos por esse sensor baseiam-se principalmente nas regiões do espectro refletido, nas bandas de 1 a 9 (0.52 a 2.5 μm), abrangendo o: visível (*Visible* - Vis); Infravermelho Próximo (*Near Infrared* - NIR); e Infravermelho de Ondas Curtas (*Short Wave Infrared* - SWIR) (Souza Filho et al. 2003; Galvão et al 2005). A região do Infravermelho Termal (*Thermal Infrared* – TIR) é coberta no ASTER por um sub-sensor de 5 bandas (10 a 14 - 8.125-10.95 μm), tornando-o o único sensor multiespectral termal de sua categoria. O TIR é de extrema importância para o estudo do comportamento espectral de minerais (Hook et al., 1999), mas ainda é pouco utilizado, principalmente, em ambientes tropicais (Lima, 2003, Vicente, 2007). Desta forma, existe um amplo campo de aplicações ainda não testadas referente ao uso dessa região do espectro eletromagnético, a qual é em parte abordada neste trabalho.

Neste contexto, este estudo utiliza as bandas do SWIR e TIR do sensor ASTER para caracterização espectral e mapeamento de componentes minerais típicos de solos tropicais relacionados a processos de degradação de terras, mais especificamente ao processo conhecido como arenização, o qual está relacionado ao retrabalhamento de depósitos areníticos e formação de solos com alto teor de areia (Suetegaray et al., 2001). Esse tipo de degradação tem como conseqüências o aumento da erosão, incapacidade de retenção da cobertura vegetal e inviabilização do uso agrícola.

2. Material e Método

A área escolhida para o mapeamento faz parte do município de São Francisco de Assis, na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, conforme quadrilátero formado pelas coordenadas 55° 4' 48''w, 29° 20' 24''s e 55° 15' 36''w, 29° 36' 36''s. Os solos da área variam entre: Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos (RGS-SAA/IBGE – Geologia, 2003). Porém, a intensa movimentação dos solos arenosos confere características muito peculiares a essa classificação em escalas locais. A pluviosidade da área é consonante com climas tropicais e subtropicais, mantendo consideráveis níveis de umidade, oscilando entre 1.250 a 1.500 mm anual, com médias mensais superiores a 100 mm em grande parte dos meses.

Foi utilizada uma cena ASTER com data de passagem de 19 de julho de 2007, no nível 1B de processamento, nas bandas AST1 a AST9 no VNIR-SWIR, e AST10 a AST14 no TIR, com correções geométricas e radiométricas aplicadas na versão V003. As 9 bandas do VNIR foram submetidas à correção do efeito *crosstalk*, conforme descrito em Iwasaki e Tonooka (2005). Em seguida, os dados foram compensados para minimização dos efeitos atmosféricos e corrigidos para reflectância com base no modelo de transferência radiativa (MODTRAN) (ACORN, 2002), considerando parâmetros climáticos e geodésicos locais. Isso permitiu a análise direta do comportamento espectral das feições diagnósticas inerentes à composição físico-química dos materiais sob investigação na área de estudo. Devido a diferença de resolução espacial entre as bandas do VNIR (15m) e do SWIR (30m), foi realizada uma re-amostragem espacial das bandas do SWIR, aumentando artificialmente sua resolução para 15m, permitindo, assim, a composição de um imagem com 9 bandas espectrais.

No caso dos dados ASTER-TIR, optou-se pela correção dos dados termais (bandas 10 a 14µm) nível 1B. Mesmo conhecendo a alta qualidade dos dados de emissividade gerados pela NASA através do produto AST05, buscou-se um maior controle sobre os parâmetros de correção, principalmente considerando-se o regime climático tropical local, bem como o caráter inédito de procedimentos deste tipo no Brasil, relativo a reprodução de assinaturas espectrais no TIR para sensoriamento remoto.

Para tanto, numa primeira etapa, cada conjunto dos dados originais em DN's (*digital numbers*) correspondente as bandas TIR foi multiplicado pelo seu coeficiente de calibração, convertendo seus valores para radiância do sensor ($Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$). Para a minimização dos efeitos da atmosfera foi aplicado sobre os dados convertidos para radiância, o algoritmo de compensação atmosférica com base em parâmetros da própria cena (*In-Scene Atmospheric Compensation* - ISAC) (Jonhson & Young, 1998). Esse algoritmo utiliza a temperatura de brilho do sensor (T_b) para estimativa da radiância de superfície (L_{sup}), através da derivação da equação de Planck. Para esse cálculo, foram escolhidos os pixels com maior temperatura de brilho pelo método *Most Hits*, normalizados pelo ruído do próprio sensor ($NESR=0.30$). Dessa forma, estimou-se os espectros de compensação atmosférica de transmitância (τ) e radiância atmosférica no caminho até o sensor ($LA\uparrow$), sobre toda a cena, através de uma função linear entre radiância do sensor (L_{sen}) e radiância de superfície (L_{sup}).

Numa última de etapa, para conversão dos dados para emissividade foi utilizado o algoritmo *Emissivity Normalization*, o qual realiza a conversão à emissividade considerando um valor de emissividade fixo como referência para o cálculo da temperatura de cada pixel, em cada banda, utilizando somente os valores mais altos (Kealy & Hook, 1993). O valor de referência da emissividade (ϵ_m) utilizado foi obtido com base em assinaturas espectrais típicas do quartzo, mineral de referência com os maiores valores de emissividade na área de estudo (0.96). O procedimento *Emissivity Normalization* é utilizado neste trabalho por mostrar-se

muito eficiente na reprodução das formas das assinaturas espectrais (Kealy & Hook, 1993), facilitando a caracterização espectral da cobertura em etapa seguinte.

Através de trabalho de campo foram coletadas 30 amostras de solo na área de estudo, em locais de solo exposto. Tais amostras foram escolhidas segundo variação de coloração (tabela Mansell) e textura em pré-classificação de campo, numa profundidade de 0-20 cm, 80-100 cm e 180-200 cm, e analisadas posteriormente quanto as suas propriedades físicas e químicas: (i) granulometria pelo método de pipeta, com separação das frações de areia, silte e argila (Embrapa, 1997-Labsol/Feagri); (ii) Difratometria de Raio X (*Siemens Diffraktometer Kristallofe*).

Para cada ponto de coleta de solo, foram extraídas assinaturas espectrais dos pixels equivalentes nas imagens ASTER-SWIR/TIR. Como auxílio na caracterização espectral das feições diagnósticas das assinaturas, foi utilizada a biblioteca espectral da John Hopkins University (JHU), além das análises físicas e químicas das amostras. Como forma de convalidação entre sub-sensores, no caso o SWIR e o TIR do ASTER, foram utilizados dados de reflectância medidos por espectroradiômetro (*Fieldspec Full Resolution – LER/Unicamp*) em condições de laboratório (não apresentados nesse trabalho; cf. em Vicente 2007).

Após a caracterização espectral dos componentes minerais, foram definidas as combinações de bandas em triplets (RGB) para o mapeamento dos minerais identificados em campo. Foram utilizados nesta etapa os dados de radiância do ASTER-TIR corrigidos para os efeitos da atmosfera. Para supressão do ruído e realce dos alvos foi utilizado o método de Realce por Decorrelação (RDC). Esse é um método clássico de processamento de dados termiais, tendo sido amplamente usado em sensores como o TIMS (*Thermal Infrared Multispectral Scanner*), e tem o objetivo de diminuir a alta correlação típica entre as bandas de dados termiais (Gillespie *et al.*, 1984). O alto grau de correlação entre bandas em dados termiais deve-se ao fato de que os valores de radiância de superfície são função direta da temperatura e emissividade da superfície (Vaughan *et al.*, 2005). Essa relação entre os dados gera valores baixos de radiância, os quais são localizados muito próximos na nuvem de pixels numa disposição RGB padrão, acarretando baixo contraste e, por conseguinte, pouca variação de matizes entre os canais de cores (Gillespie *et al.*, 1984). O RDC aumenta o contraste da nuvem de dados, mostrando as variações de emissividade como diferenças de cor, realçando feições diagnósticas e diferenças de temperatura como variações no brilho. Os valores de emissividade relacionam-se com as características dos alvos e os valores de temperatura dizem respeito, principalmente, a variações do relevo, como sombras topográficas (Gillespie *et al.*, 1984).

Dessa forma, o uso dos dados corrigidos para emissividade (ϵ) serviu de orientação na escolha das bandas para as composições coloridas utilizadas em conjunto com o RDC. Esse método de classificação permitiu uma validação eficiente e direta do comportamento das bandas ASTER-TIR em relação as feições diagnósticas dos minerais identificados, bem como das correções empreendidas nos dados convertidos para radiância (L_{sup}).

4. Resultados e Discussão

A natureza extremamente dinâmica do processo de arenização pressupõe um recobrimento acelerado da areia que avança progressivamente sobre diferentes tipos de solo e coberturas vegetais, tornando uma classificação pedológica tradicional meramente indicativa para o seu entendimento. Porém, mesmo em meio a solos classificados como arenosos, a mínima presença de argilo-minerais constitui-se num importante indicador das possíveis variações desse processo. Na tabela 1 observa-se essa variação numa toposequência das amostras coletadas numa pequena área com 600 metros de extensão, com a presença de argilo-minerais em meio aos solos arenosos.

Tabela 1 – Dados granulométricos e de composição mineralógica de amostras de solos arenosos numa toposequência (0-20 cm) da área de estudo. As informações obtidas a partir da difratometria de Raio-X (DRX) foram aqui restritas aos principais componentes minerais.

Amostra/cm		AREIA	ARGILA	SILTE	DRX Principais componentes minerais
		TOTAL	g/kg - (%)		
P1	0-20	902 - (90)	61 - (6)	37 - (4)	Quartzo, Montmorilonita
	80-100	807 - (81)	131 - (13)	61 - (6)	
	180-200	806 - (81)	104 - (10)	90 - (9)	
P2	0-20	902 - (90)	52 - (5)	46 - (5)	Quartzo, Montmorilonita
	80-100	885 - (88)	60 - (6)	55 - (6)	
	180-200	898 - (90)	49 - (5)	53 - (5)	
P3	0-20	910 - (91)	54 - (5)	36 - (4)	Quartzo, Montmorilonita
	80-100	865 - (87)	83 - (8)	52 - (5)	
	180-200	860 - (86)	86 - (9)	53 - (5)	
P4	0-20	935 - (84)	41 - (4)	24 - (2)	Quartzo, Montmorilonita
	80-100	906 - (91)	54 - (5)	40 - (4)	
	180-200	894 - (89)	59 - (6)	47 - (5)	
P5	0-20	910 - (91)	53 - (5)	37 - (4)	Quartzo, Montmorilonita, Caulinita
	80-100	858 - (86)	87 - (9)	55 - (5)	
	180-200	839 - (84)	103 - (10)	58 - (6)	
P6	0-20	960 - (96)	33 - (3)	7 - (1)	Quartzo, Montmorilonita, Caulinita
	80-100	946 - (95)	41 - (4)	13 - (1)	
	180-200	950 - (95)	39 - (4)	11 - (1)	

Os argilo-minerais mais comuns encontrados nos solos com alta concentração de areia na área de estudo foram montmorilonita e caulinita. A DRX indicou pequena quantidade e, por vezes, inter-estratificação com outros minerais, como illita-montmorilonita. Corroborando o caráter de recobrimento da areia nas camadas de solo mais superficiais, os valores da fração argila aumentam na proporção de sua profundidade de coleta, podendo estar associada aos mesmos minerais da camada superior, porém, em maiores concentrações.

4.1. Caracterização espectral de minerais no TIR

O comportamento de minerais no TIR apresenta particularidades, principalmente em relação aos silicatos, visto que suas principais feições de absorção ocorrem na faixa centrada em 10 μm (Hook et al., 1999). Essas feições estão relacionadas à ligação Si-O, a qual apresenta a mínima emissividade e máxima reflectância ("banda *reststrahlen*") nos modos de estiramento de ondas mais curtas para ondas mais longas, definidas por ligações tetraédricas na estrutura cristalina do mineral. Esse comportamento pode ser verificado em silicatos ordinários como o quartzo (SiO_2), que apresenta feições em torno de 8.2 e 9.3 μm , bem como em silicatos de compleição argilosa, como a caulinita e a montmorilonita, (Hook et al., 1999) (Fig. 1a). O quartzo, em particular, não apresenta feições diagnósticas significativas no espectro refletido (VNIR-SWIR), o que torna o uso do TIR um bem vindo avanço no mapeamento remoto deste mineral, principalmente considerando sua importância na composição dos solos.

Esse comportamento espectral foi verificado nas assinaturas espectrais dos pixels das imagens ASTER-TIR (Fig. 1b), que apresentam comportamento análogo aos espectros de referência da JHU, conservando as mesmas feições diagnósticas relativas a banda *reststrahlen* (8.12 – 9.2 μm) (Fig. 1a). Essas assinaturas foram adquiridas sobre os locais de coleta de

campo com presença de argilo-minerais, conforme verificado na DRX. Observa-se no exemplo da figura 1c que nos espectros coletados na imagem ASTER-SWIR sobre esses mesmos locais, encontram-se feições diagnósticas relativas à ligações OH (hidroxilas), também associadas a argilo-minerais.

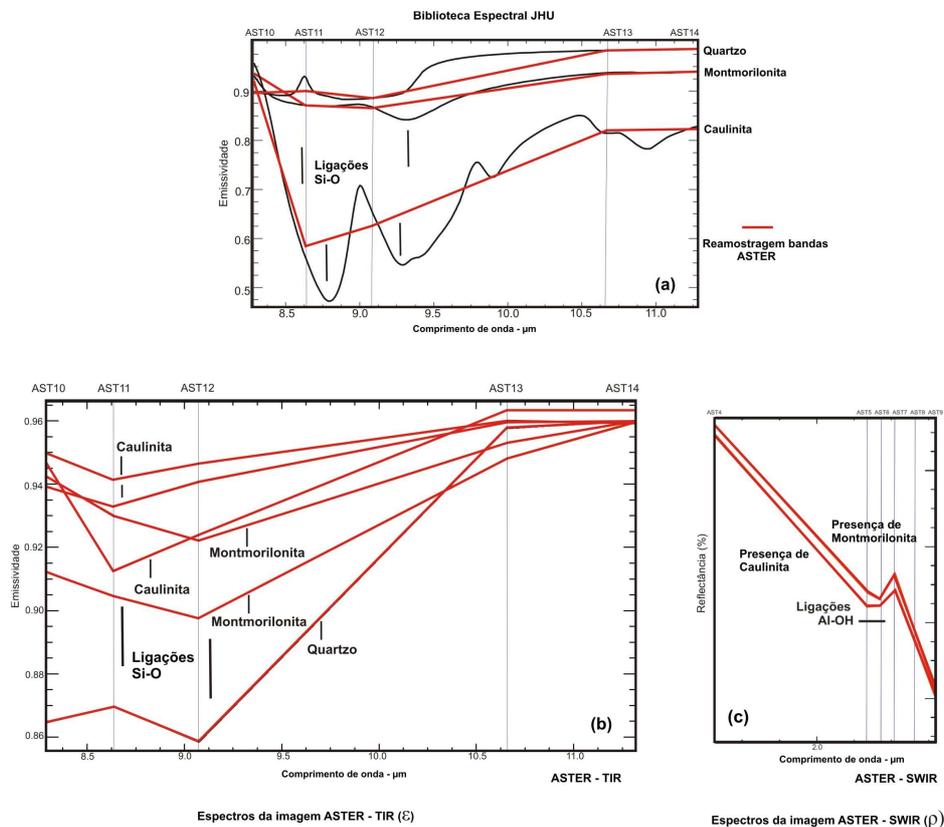


Figura 1. (a) Em linha preta, espectros da JHU de minerais observados no campo e, em linha vermelha, os mesmos espectros re-amostrados para a resolução espectral do sensor TIR do ASTER.. (b) Exemplos de espectros extraídos dos pixels da imagem ASTER-TIR, convertida para emissividade, sobre áreas com presença dos minerais sob investigação (cf. dados de DRX na Tabela 1). (c) Espectros coletados na imagem ASTER-SWIR sobre os mesmos locais de coleta de campo, com destaque para as feições marcadas pelas bandas 5 (2.16 μm) e 6 (2.20 μm), devidas a presença da ligação Al-OH em argilo-minerais.

Segundo observa-se nas Figuras 1a e 1b, as diferenças dos valores de emissividade entre o quartzo e os argilo-minerais nas bandas AST 10 a 12, fornecem uma estimativa da presença e abundância relativa dos mesmos, visto que apresentam um comportamento inversamente proporcional. Como previsto, as assinaturas espectrais da imagem ASTER (Fig. 1a) não apresentam os mesmos valores de emissividade das utilizadas como referência (Figura 1b), porém, conservam suas respectivas feições (posição e geometria) diagnósticas. Esse comportamento se deve a mistura de materiais no pixel (90 m) tais como: vegetação rasteira e outros minerais, além da pequena quantidade dos argilo-minerais encontrados, segundo verificado nas DRX, e conforme pôde ser estimado na classificação a seguir.

4.2. Realce por decorrelação

Na Figura 2a pode-se observar o resultado da composição colorida (CC) AST13/AST12/AST10 (RGB), utilizando-se dados corrigidos para radiancia de superfície (Lsup). A figura 2b apresenta o resultado da aplicação do RDC nas bandas AST13/AST12/AST10 (RGB). Nessa imagem realçada é possível notar que o pretendido

aumento de contraste é generalizado, potencializando também o aparecimento de ruídos contidos na imagem ASTER-TIR. Para supressão dos mesmos optou-se primeiramente pela segregação da informação nos pixels mais claros, por meio do ajuste de histograma, seguido da aplicação de um filtro de convolução de mediana (5x5 pixels). O resultado obtido desse procedimento é ilustrado na figura 2c.

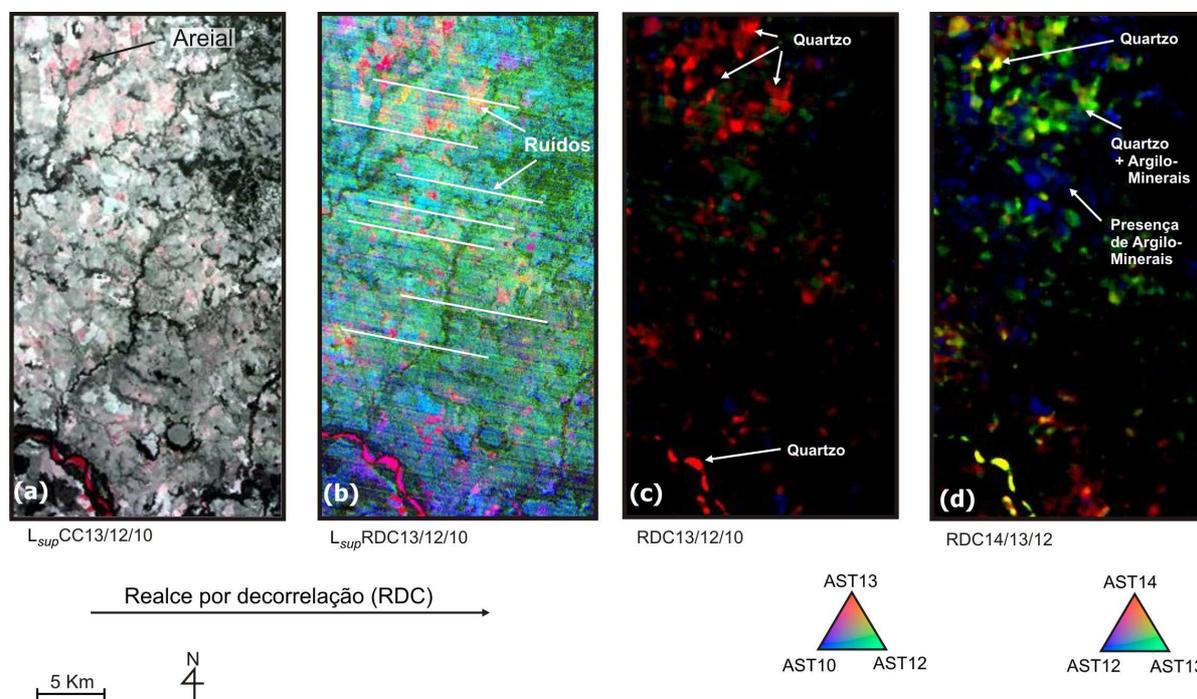


Figura 2. Realce por decorrelação (RDC) aplicado às imagens ASTER-TIR. (a) Composição colorida das bandas AST13/12/10 em RGB com correção atmosférica aplicada. (b) RDC aplicado a composição colorida AST13/12/10 com destaque para os ruídos típicos da alta correlação inter-bandas. (c) Imagem RDC pós-processada, com ajuste de histograma e filtro de mediana (5x5). Os pixels em vermelho estão associados a áreas ricas em quartzo. (d) RDC aplicado à composição colorida AST14/12/10, com histograma ajustado e filtro de mediana (5x5). Nesta composição os pixels verdes indicam a mistura entre argilo-minerais e quartzo.

A composição AST13/AST12/AST10 (RGB) é clássica (Hook et al., 1999) e oferece uma ampla cobertura de minerais (Fig. 5.10c). Nessa composição, as bandas AST12 (9.07 μm) e AST10 (8.2 μm), alocadas, respectivamente, nas cores verde e azul, compreendem as faixas espectrais onde a emissividade do quartzo é baixa, em contraposição às altas emissividades deste mineral na banda AST13 (10.6 μm), alocada à cor vermelha. Dessa forma, essa combinação identifica áreas ricas em quartzo com pixels em vermelho. Locais que apresentam misturas entre quartzo e argila são identificadas por pixels em tons de roxo. Pixels verdes estão associados a solos com presença de argila cobertos com vegetação (Fig. 2c).

A CC AST14/AST13/AST12 (Vaughan, et al., 2005), oferece uma melhor discriminação de áreas ricas em quartzo, mapeadas em pixels amarelos, visto que atribui os canais vermelho e azul para as bandas AST14 e AST13, ambas cobrindo regiões de baixa emissividade do quartzo em torno de 11 μm . Essa combinação favorece a separação entre quartzo e argila, visto que o canal azul é atribuído à banda AST12, que cobre uma região do espectro (~9 μm) com baixa emissividade do quartzo e alta emissividade da caulinita e montmorilonita (Vaughan *et al.*, 2005). Nessa composição, a identificação da mistura entre quartzo e argila é evidenciada por meio de pixels verdes (Fig. 3d).

Comparando-se os resultados da RDC da composição colorida AST13/AST12/AST10 sobre a banda AST3, com a CC_AST231 (VNIR), referentes à principal mancha de areial (detalhes – Fig. 3f), pode-se observar a separação de áreas em vermelho intenso associadas ao

quartzo e que apresentam correlação com pixels mais claros na CC_AST231 (detalhes – Fig. 3c). Porém, áreas adjacentes, com leve coloração vermelha na CC_AST231, que podem estar associadas à presença de argila, encontram-se entremeadas por vegetação rasteira em ambos os detalhes nas figuras 3c e 3b. Essas mesmas manchas estão associadas a pixels verdes nas figuras 3i e 3g, conforme explicitado anteriormente. A vegetação mais densa, identificada por pixels de verde intenso nas CC_AST231 (figuras 5.11a, c, b), não é destacada no produto derivado do RDC (pixels escuros nas figuras 3d, e, f), atestando uma boa separação de alvos de baixa emissividade, no caso as argilas e a vegetação. Porém, a associação de argilas à vegetação rasteira torna a identificação das primeiras um tanto genérica para pequenas áreas. Contudo, no que tange a dinâmica dos areiais, a mínima presença de vegetação também pode ser um bom indicador de estabilidade ou recuperação.

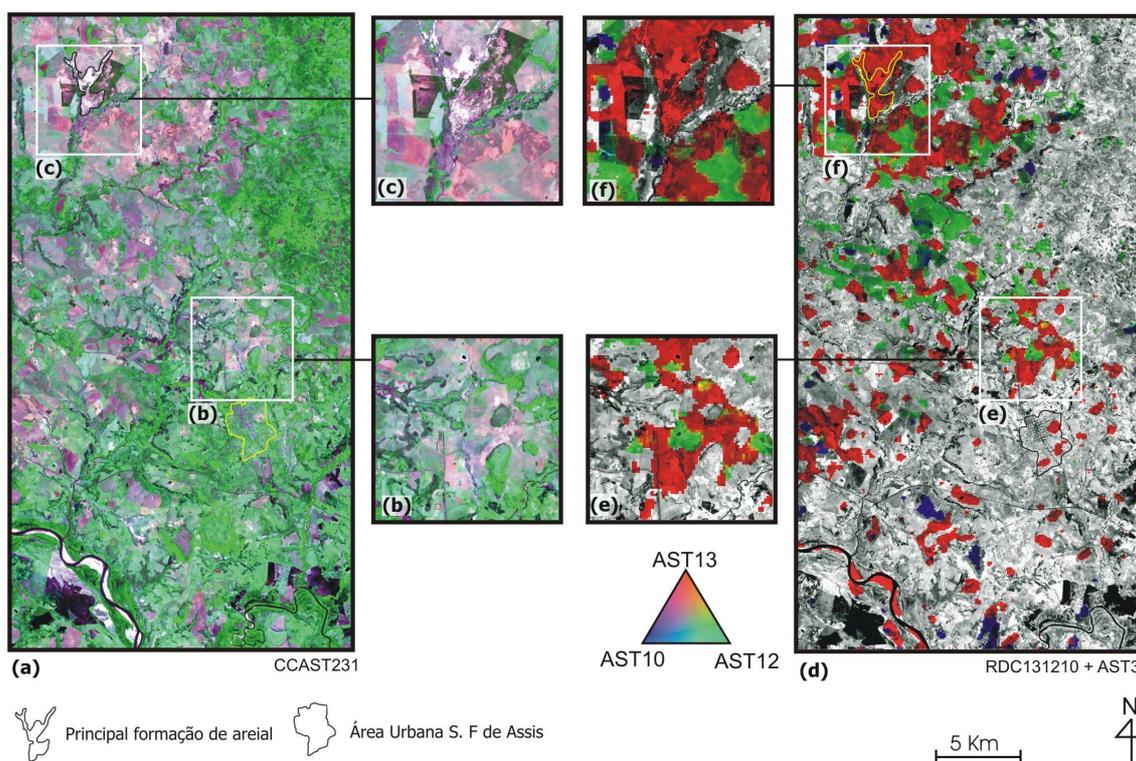


Figura 3. Comparação entre a CC_AST231 (a) e o produto gerado a partir do RDC das bandas AST13/12/10 (com a imagens da banda AST3 no ‘background’) (d). Por meio das figuras (b), (c), (e), (f) é possível observar detalhes de ambas as imagens, com ênfase em áreas ricas em quartzo e sua separação das argilas. Para uma melhor visualização, os histogramas foram ajustados de modo a superestimar as áreas com presença de argilo-minerais.

5. Conclusões

O uso dos dados ASTER permitiu a comparação da resposta espectral dos minerais sob investigação na área de estudo, sendo possível implementar uma eficiente co-validação entre duas importantes regiões do espectro eletromagnético (SWIR e TIR) abrangidas por este sensor. Destaca-se, neste caso, as feições associadas a banda *reststrahlen* no TIR, as quais são de suma importância por referirem-se a componentes minerais muito comuns em solos tropicais, bem como sua pouca utilização em mapeamentos remotos em solos deste tipo.

O maior controle das correções empreendidas nos dados ASTER-TIR mostrou-se importante para a definição das feições diagnósticas nas assinaturas espectrais da imagem, principalmente dos argilo-minerais, já que considerando a baixa relação sinal-ruído no TIR,

os baixos valores de emissividade desse material dificultam a definição de suas feições de absorção. Isso pôde ser verificado pelo mapeamento da abundância dos componentes minerais na área de estudo. Neste caso, o uso de composições coloridas das bandas associadas às feições diagnósticas identificadas obteve resultados bastante satisfatórios.

Sob o aspecto do processo de arenização, a quantificação entre argilo-minerais e quartzo fornece a possibilidade de mapeamentos mais precisos quanto a condição de degradação do local, visto que áreas com alta abundância de quartzo e baixa presença de argilo-minerais indicam predominância de solos arenosos, pouca vegetação e grande perda de nutrientes por drenagem excessiva.

6. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fomento direcionado a este trabalho e ao projeto de pós-doutoramento do qual ele faz parte.

7. Referências

Galvão, L. S.; Almeida-Filho, R., & Ícaro, V. (2005). Spectral discrimination of hidrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 7, 107-114.

Gillespie, R; Kahle, A. B., & Palluconi, F. D. (1984) Mapping alluvial fans in death valley California, using multiespectral thermal. Infrared images. **Geophysical Research Letters**, 11(11):1153-1156.

Hook, S. J.; Abbot, E. A.; Grove, C.; Kahle, A. B., & Palluconi, F. D. (1999). **Use of multiespectral thermal infrared data in geological studies**. In: A. N. Rencz (Ed.), Remote sensing of earth sciences: Manual of remote sensing, v.3, (3rd ed.), p. 59-110. New York: John Wiley and Sons.

Iwasaki, A., & Tonooka, H. (2005). Validation of a crosstalk correction algoritm for ASTER/SIWR. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 43(12): 2747-2751.

Kealy, P. S. & Hook, Simon, H. (1993). Separating Temperature and Emissivity In Thermal Infrared Multiespectral Scanner Data: Implications for Recovering Land Surface Temperatures. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 31(6): 1155-1164.

Lima, V. S. (2003). **Assinaturas espectrais de gossans associados a mineralizações de Pb-Zn-Ba na bacia de Irecê (BA): um estudo baseado em dados dos sensores TM e ASTER.** Dissertação de mestrado (Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 154 p.

Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura e Abastecimento/Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003). **Mapa Pedológico 1** : 250 000 – folhas SH.21-X-D e SH.21-Z-B.

Souza Filho, C. R., Tápia, C. H., Crósta, A. P., & XAVIER, R. P. (2003). Infrared spectroscopy and ASTER imagery analysis of hidrothermal alteration zones at the Quellaveco Porphyry-Cooper Deposit, Southern Peru. In: **Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)**, Annual Conference – “Technology: Converging at the Top of the World”, 1-12.

Suertegaray, D. M. A.; Guasseli, L. A. & Verdum, R. (org.). (2001). **Atlas da Arenização: sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Rio Grande do Sul, Secretaria Estadual de Coordenação e Planejamento, 84 p.

Vaughan , R. G.; Hook, S. J.; Calvin, W. M. Taranik, J. V. (2005). Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, multi-wavelength thermal infrared images. **Remote Sensing Environment**, 99: 140-158.

Vicente, L. E. (2007). **Caracterização de sistemas ambientais tropicais complexos utilizando análise sistêmica e classificação hiperespectral de dados do sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)**. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 192p.