

Utilização de imagens multiespectrais termais do sensor ASTER para mapeamento remoto de prováveis áreas com feições de impacto em crateras africanas

Thais Andressa Carrino¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹

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

Abstract. This work approaches the use of ASTER thermal infrared data for spectro-mineralogical characterization of targets of interest in impact crater research, particularly quartz-rich rocks, minerals that favorably register and preserve shock features. The study demonstrated, using the Tin Bider structure (Argelia) as a control, that ASTER emissivity data, when classified through adapted hyperspectral processing techniques (Spectral Angle Mapper and Mixture Tuned Matched Filtering), are able to identify this mineral, a fact that plays an important role to properly address the origin of such structures in the African continent.

Palavras-chave: thermal infrared, ASTER, mineral mapping, impact craters, Africa, infravermelho termal, ASTER, mapeamento mineral, crateras de impacto, África.

1. Introdução

Desde seu lançamento em 1999, o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra, tem a sua potencialidade já bem documentada em diversos trabalhos acerca do monitoramento e exploração dos recursos naturais terrestres (e.g., Ducart, 2003; Augusto et al., 2006).

Um campo menos explorado constitui a caracterização espectral de crateras de impacto, como forma de mapeamento remoto que, nas diversas localidades do mundo, em geral, não são estruturas muito bem documentadas e mapeadas. Estas estruturas são corpos, em geral circulares, formadas por impacto/colisão de corpos extraterrestres na superfície da Terra, compreendendo o mais rápido processo geológico já conhecido. O crescente direcionamento a estudos de tais estruturas no mundo provém, sobretudo, do papel dos impactos na formação do Universo e também pelas ocorrências comprovadas de associação a importantes depósitos minerais (e.g., Sudbury, Canadá) e a alvos exploratórios de hidrocarbonetos.

Este estudo tem como objetivo detalhar e caracterizar, por de sensoriamento remoto, áreas mais favoráveis à identificação em campo (ou microscopicamente, por meio de amostras coletadas) de feições de impacto que, na maioria das vezes, estão associadas a litotipos ricos em quartzo, como arenitos ou rochas afins. Para tal demonstração, dados posicionados na faixa do infravermelho termal do sensor ASTER foram empregados em alvos (crateras de impacto comprovadas) localizados na África.

2. Formação de crateras de impacto e feições diagnósticas deste evento

Crateras de impacto correspondem a estruturas circulares, em geral, que caracterizam todos os planetas terrestres do Sistema Solar, inclusive a Terra. O mecanismo de geração de tais morfologias abrange três estágios (French, 1998): *Contato e Compressão*, *Escavação e Modificação*.

O estágio de *Contato e Compressão* equivale ao momento de contato do projétil (meteorito) com o alvo, ocorrendo a formação de ondas de choque em condições de pressão acima de 100 GPa. A energia cinética do projétil é transferida ao alvo (superfície terrestre),

criando condições de vaporização de ambos (**Figura 1 (a)**). Na fase de *Escavação*, há um fluxo de escavação de material ao redor do centro do impacto, devido à passagem da onda de choque. No final desta etapa, é formada a *cratera transiente*, que compreende a máxima extensão adquirida da morfologia. A última fase corresponde ao estágio de *Modificação* que é dependente da gravidade e da resistência mecânica do alvo. Na geração de crateras *simples* (**Figura 1 (a)**), é preservado o formato de “bacia”, ocorrendo pequenos colapsos de bordas que originam lentes de brechas que preenchem a base da mesma. No caso de formação de crateras *complexas*, (**Figura 1 (b)**), colapsos freqüentes das bordas e paredes da estrutura promovem a geração de falhas concêntricas, além de soerguimento de núcleo central característico.

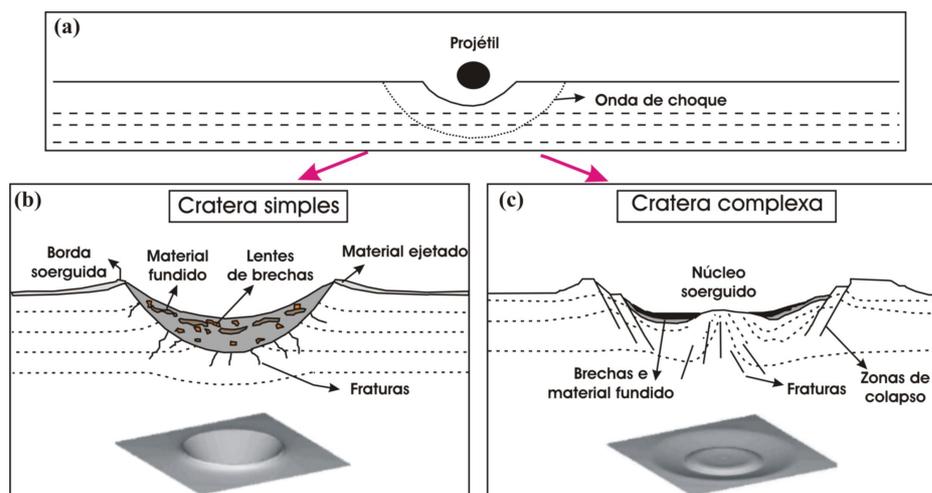


Figura 1. Esquema de dois tipos de crateras de impacto formados a partir do estágio de *Contato e Compressão* (a): cratera do tipo simples (b) e do tipo complexa (c). Modelagens tridimensionais (Pierazzo & Collins, 2003) ilustram estes dois tipos de estruturas.

As condições de formação de estruturas de impacto, basicamente a altas temperatura e pressão, favorecem o desenvolvimento de feições diagnósticas e únicas relacionadas a estes eventos. Na escala macroscópica, *shatter cones* (>2 a <30 GPa), padrões de fraturamento cônico desenvolvidos nas rochas-alvo, sobretudo em arenitos e carbonatos, são encontrados principalmente, no assoalho e no núcleo soerguido de crateras. Polimorfos minerais de alta pressão (>10 a 45 GPa) são decorrentes da passagem das ondas de choque na rocha-alvo, ocorrendo sobretudo em quartzo (que passa a coesita, sthishovita), além de grafita (transformação em diamante). Associado principalmente ao quartzo, *planar deformation features* (PDFs) são comuns, correspondendo a feições microscópicas planares, dispostas em conjuntos, em geral, paralelos. O quartzo é um mineral ideal para a observação de PDFs, uma vez que este é abundante (associado a rochas ígneas, sedimentares etc), estável, e com alta resistência ao metamorfismo e a alterações intempéricas (French, 1998).

Este conjunto de registros macro e microscópicos desenvolvidos em eventos de impacto foi considerado neste trabalho, e os minerais silicáticos, em especial o quartzo, admitidos como alvo mais propício para o registro de feições de impacto e de possível detecção remota através da metodologia proposta a seguir.

3. Feições espectrais diagnósticas de minerais silicáticos na faixa do infravermelho termal (TIR)

Definido o alvo de interesse para o mapeamento espectral, nesse o caso o quartzo, algumas considerações tornam-se cabíveis a respeito das respostas espectrais associadas a esse mineral.

As feições de absorção mais intensas de todos os silicatos ocorrem em torno de 10 μm , porção do espectro eletromagnético conhecida como região de estiramento da ligação Si-O (ou banda *reststrahlen*). Este intervalo de comprimento de onda compreende a faixa do

infravermelho termal (TIR), na qual as assinaturas espectrais são medidas em emissividade. Esta, por sua vez, pode ser expressa como a razão entre radiância espectral do material e a radiância espectral de um corpo negro para uma determinada temperatura e comprimento de onda (Lima, 2003). As variações da emissividade espectral no TIR contêm informações sobre a composição e a estrutura cristalina de rochas e minerais, que são determinadas pela posição e profundidade de bandas de absorção (c.f. Lima, 2003 e referências ali citadas).

O mineral quartzo é caracterizado pela curva espectral apresentada na **Figura 2** (linha preta), considerando-se o espectro eletromagnético contínuo na região de 8-12 μm (TIR). Re-amostrada à resolução espectral do sensor ASTER (linha vermelha da **Figura 2**), o espectro de emissividade deste mineral é caracterizado por alto gradiente entre as bandas 10-12 e a banda 14. Assinatura espectral similar não é observada na faixa que vai do visível ao infravermelho de ondas curtas para os silicatos em geral, justificando-se a escolha da faixa do TIR como primeiro passo na extração de feições diagnósticas destes minerais.

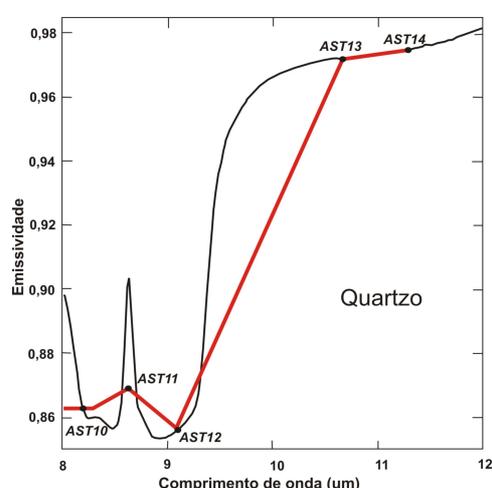


Figura 2. Curva espectral do mineral quartzo, na faixa do TIR (modificado de Lima, 2003): a linha preta corresponde à resposta espectral deste mineral no espectro eletromagnético contínuo, enquanto a linha vermelha equivale à curva anterior re-amostrada à resolução espectral do sensor ASTER (5 bandas no TIR). Nota-se, neste último caso, o alto gradiente entre as bandas 10-12 e a 14 como a principal feição espectral diagnóstica deste mineral silicático.

4. Materiais

Foram utilizadas as 5 bandas do sensor ASTER posicionadas no infravermelho termal para o estudo espectro-mineralógico proposto. Estas bandas (10, 11, 12, 13, 14) possuem comprimentos de onda médios, respectivamente, em 8,3; 8,65; 9,1; 10,6; 11,3 μm , e resolução espacial de 90 metros.

5. Estudo de caso

Das atuais 174 estruturas terrestres reconhecidas como crateras de impacto genuínas (Earth Impact Database, 2006), foram testadas, nesse estudo demonstrativo, as 19 estruturas localizadas no continente africano (**Figura 3 (a)**). A identificação de estruturas de impacto neste continente é potencializada pela existência de amplas áreas áridas e desérticas, propícias à preservação das crateras no decorrer do tempo geológico. Em contrapartida, o grau de documentação atual destas 19 morfologias, associado principalmente à disponibilidade de mapas geológicos, é escasso, sobretudo quanto às estruturas de menor dimensão e àquelas de difícil acesso (e.g., localização em desertos).

Para fins demonstrativos, o procedimento visando à detecção de litotipos ricos em quartzo foi aplicado à cratera de Tin Bider (Argélia) (**Figura 3 (b)**). A escolha desta estrutura para o estudo foi feita em função dos seguintes fatores: **(i)** existência de descrições detalhadas dos litotipos e da posição relativa dos mesmos na estrutura, apresentadas em Koeberl (1994); **(ii)**

boas condições de afloramento; **(iii)** ocorrências de feições de impacto nas rochas ricas em quartzo presentes no centro da estrutura (e.g., *shatter cones*, PDFs etc).

A cratera de Tin Bider possui, pelo menos, três anéis concêntricos com, respectivamente, 2, 3,5 e 6 km de diâmetro (Koeberl, 1994). O centro e o anel mais interno da estrutura, são compostos por arenitos do Cretáceo Inferior, os quais afloram cerca de 500 m acima de sua posição estratigráfica 'normal'. Estas litologias foram soerguidas durante o processo de *modificação* da cratera. O restante da mesma é composto predominantemente por carbonatos e argilo-minerais do Cretáceo Superior (Koeberl, 1994).

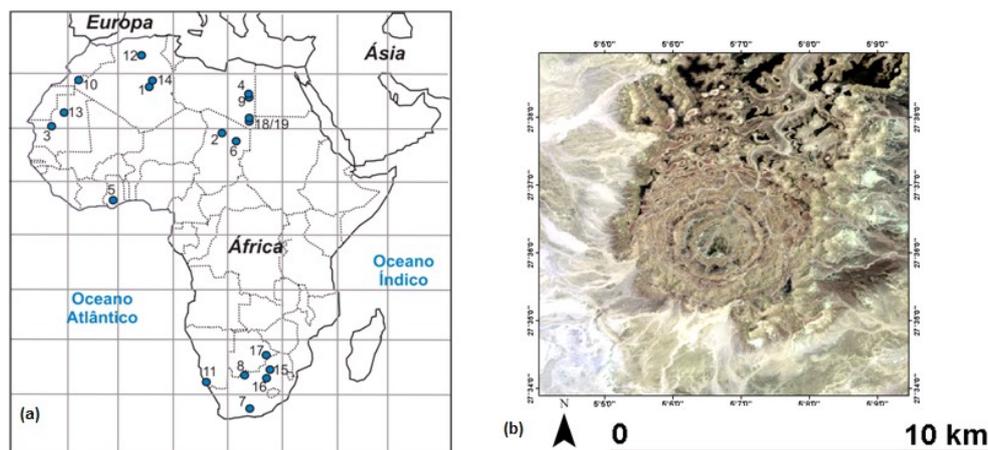


Figura 3. (a) Mapa do continente africano, indicando as 19 estruturas de impacto comprovadas: 1-Amguid (Argélia), 2- Aorounga (Chade), 3- Aouelloul (Mauritânia), 4- B.P. Structure (Líbia), 5- Bosumtwi (Gana), 6- Gweni-Fada (Chade), 7- Kallkop (Áf. do Sul), 8- Morokweng (Áf. Do Sul), 9- Oasis (Líbia), 10- Quarkziz (Argélia), 11- Roter Kamm (Namíbia), 12- Talemzane (Argélia), 13- Tenoumer (Mauritânia), 14- Tin Bider (Argélia), 15- Tswaing (Áf. Do Sul), 16- Vredefort (Áf. Do Sul), 17- Kgagodi (Botswana), 18/19- Arkenu 1 e 2 (Líbia). (b) Carta-imagem (ASTER) da estrutura de impacto de Tin Bider (3, 2, 1 em RGB), estudo de caso para caracterização espectral de áreas potenciais na identificação de feições de impacto (número 14 em (a)).

6. Pré-processamento de dados TIR do sensor ASTER

Os dados originais da imagem ASTER posicionados no TIR e em DN foram convertidos à emissividade por meio de três etapas de pré-processamento. O primeiro passo consistiu na conversão dos dados em DN para a radiância do sensor, a partir da multiplicação dos coeficientes de calibração específicos para cada banda TIR. Sobre os dados convertidos à radiância, foi aplicada uma correção atmosférica segundo a técnica denominada *In-Scene Atmospheric Compensation*, descrita em Johnson & Young (1998). Em seguida, foi aplicada a técnica de *Normalização da Emissividade*, algoritmo que calcula a temperatura para cada pixel em cada banda, utilizando um valor de emissividade fixo. A temperatura mais alta para cada pixel é então utilizada para o cálculo dos valores de emissividade, fundamentado na função de Planck (Hook et al., 1992). Destes procedimentos, obtém-se as cinco bandas TIR do ASTER convertidas à emissividade.

Com os dados ASTER corrigidos, uma análise visual preliminar dos mesmos foi realizada, como indicada na **Figura 4**. Neste caso, foi possível realçar, por meio da composição colorida 14, 12, 10 (RGB), alvos ricos em silicatos nas porções avermelhas, entre os quais, está incluso o mineral quartzo. A partir da análise visual, curvas espectrais foram extraídas, observando-se a contribuição, em termos composicionais, do mineral SiO₂.

Os métodos de investigação adotados para discriminação espectro-mineralógica de rochas ricas em quartzo na estrutura de Tin Bider (Argélia) são apresentados a seguir.

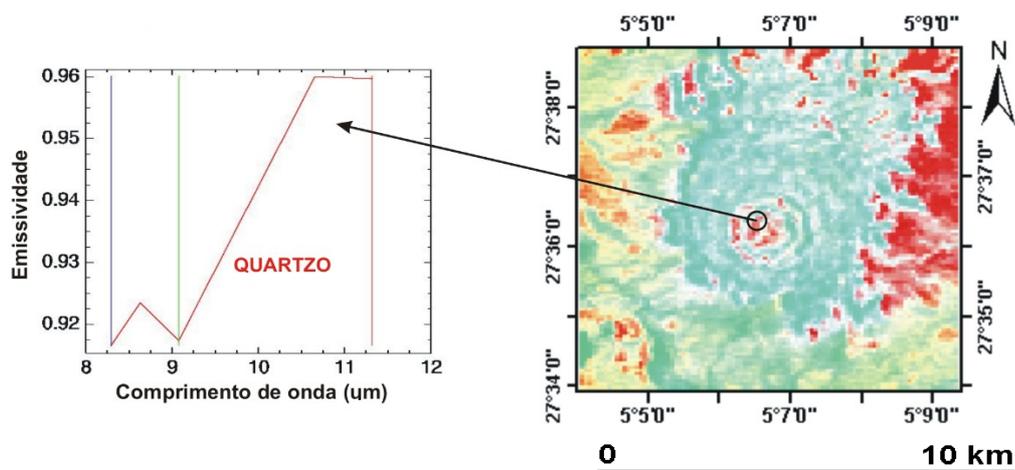


Figura 4. Imagem ASTER na composição 14, 12, 13 (RGB) (à direita), convertida à emissividade, abrangendo a Estrutura de Tin Bider (Argélia). Colorações avermelhadas indicam abundância em minerais silicáticos, dentre os quais o quartzo, mineral caracterizado pela curva espectral à esquerda, extraída da imagem.

7. Aplicação da técnica *razão de bandas*

Muito utilizada em dados multiespectrais, a *razão de bandas* permite discriminar diferentes materiais superficiais com base na análise das características da curva espectral, constatadas pelo posicionamento de gradientes de reflectância ou de emissividade do(s) alvo(s) adotado(s), ao longo do intervalo do espectro eletromagnético considerado.

Observando-se os picos e baixos de emissividade referentes ao mineral quartzo (**Figura 2**), realizou-se a razão das bandas AST14/AST12, de forma a realçar, por contraste de emissividade, áreas potencialmente ricas neste silicato. A **Figura 5 (a, b)** ilustra o resultado obtido, indicando a presença de quartzo na estrutura de Tin Bider por meio de pseudo-cor.

8. Mapeamento espectral com algoritmos classificadores

À imagem convertida à emissividade, foi aplicada uma análise semi-automática para classificação espectral de áreas potencialmente ricas em quartzo. Inicialmente foi realizada uma transformação MNF (*Minimum Noise Fraction*) para determinação da dimensionalidade espectral inerente aos dados e segregação de ruídos. Em seguida, foi calculado o PPI (*Pixel Purity Index*) e derivadas classes de agrupamento estatístico. Cinco (5) espectros de referência foram derivados neste processo. O espectro de emissividade do mineral quartzo (e.g, **Figura 2** ou **Figura 4**), dentre os cinco espectros derivados (*endmembers*), foi obtido por meio deste conjunto de procedimentos adotados e selecionado para a aplicação seguinte de dois algoritmos de classificação hiperespectral (*Spectral Angle Mapper* e *Mixture Tuned Matched Filtering*).

- ***Spectral Angle Mapper* (SAM):** é uma técnica de classificação supervisionada que mede a *similaridade* entre os *endmembers* (a referência, no caso, é o espectro de emissividade do quartzo) e as curvas espectrais de cada pixel da imagem. Quanto o menor ângulo espectral entre os dois espectros (considerados como vetores), maior a similaridade obtida (Kruse et al., 1993; Research & Systems Inc., 2003). Os resultados derivados desta classificação supervisionada, após ajuste do histograma da imagem, são apresentados em pseudo-cor nas **Figuras 5 (c), (d)** e **Figura 6 (a)**. Áreas com presença de quartzo são indicadas em vermelho.

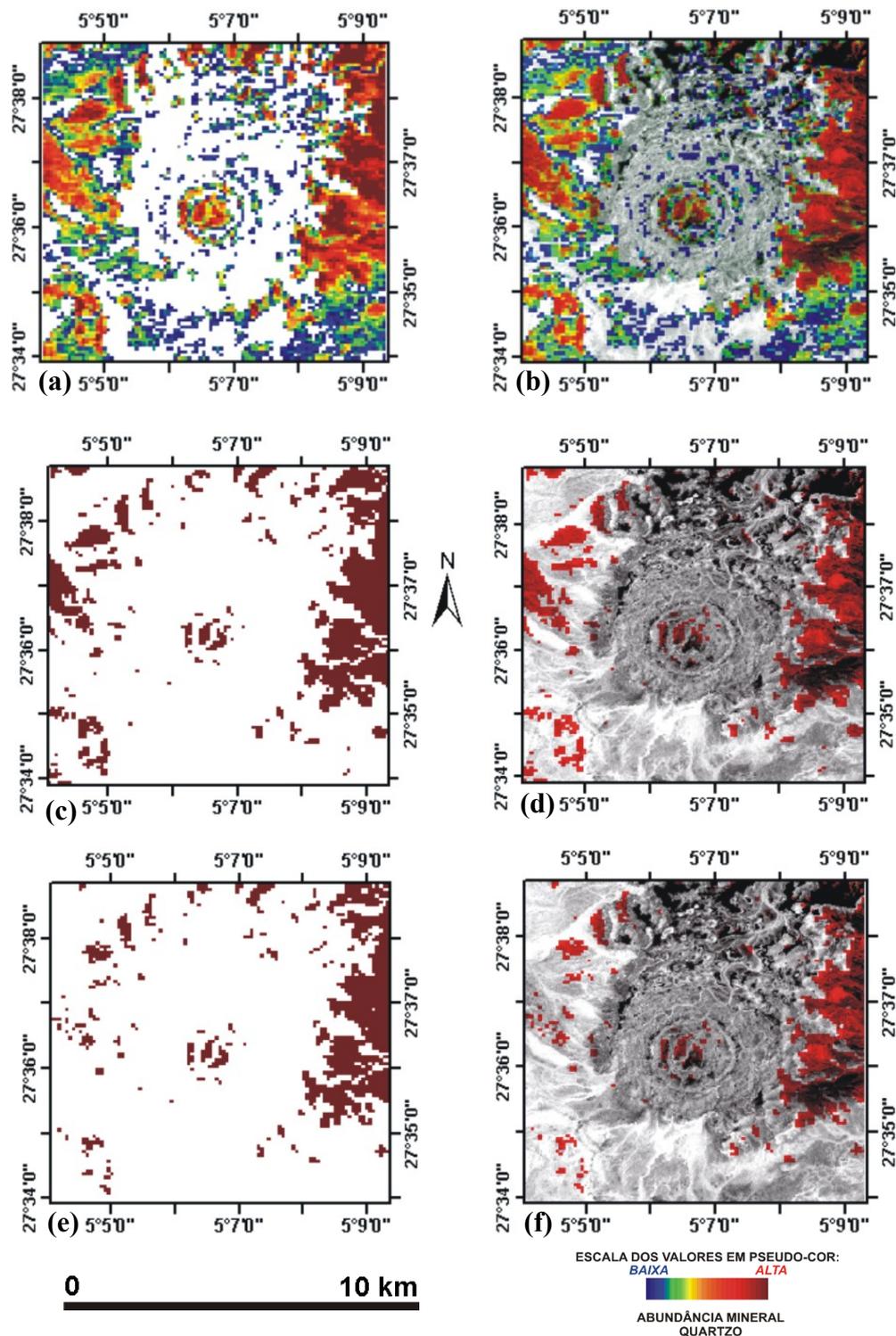


Figura 5. Resultados do mapeamento espectral do mineral quartzo na cratera de Tin Bider (Argélia) por meio: da razão das bandas AST14/AST12 em (a) e (b); da classificação supervisionada SAM em (c) e (d); da classificação através da aplicação do algoritmo MTMF em (e) e (f). Para cada técnica empreendida, a abundância do mineral quartzo é mostrada em pseudocor e por meio da fusão deste resultado em sobreposição com a banda 3 do sensor ASTER, respectivamente. Estes resultados foram previamente ajustados ao histograma das imagens.

- **Mixture Tuned Matched Filtering** (MTMF): corresponde ao algoritmo de classificação cuja finalidade é o mapeamento de abundância de *endmembers* (no caso, o espectro de emissividade do mineral quartzo) na escala de sub-pixel (Boardman et al., 1995; Research & Systems Inc., 2003), utilizando-se para tal, um filtro de ajuste (*Matched Filter*). Este atua de forma a maximizar a resposta dos *endmembers*, enquanto um outro filtro elimina a resposta de espectros desconhecidos de fundo (*background*). O mapeamento espectral do mineral quartzo com a aplicação desse algoritmo é apresentado em pseudo-cor nas **Figuras 5 (e), (f) e Figura 6 (b)**. Estes resultados foram obtidos por meio da análise de um gráfico bi-dimensional derivado da escolha de duas bandas geradas (par *score* e *improbabilidade*). Interativamente, foram delimitados os pixels 'puros' (coincidentes com o *endmember*), e que traduzem um alto *score* e baixa *improbabilidade*.

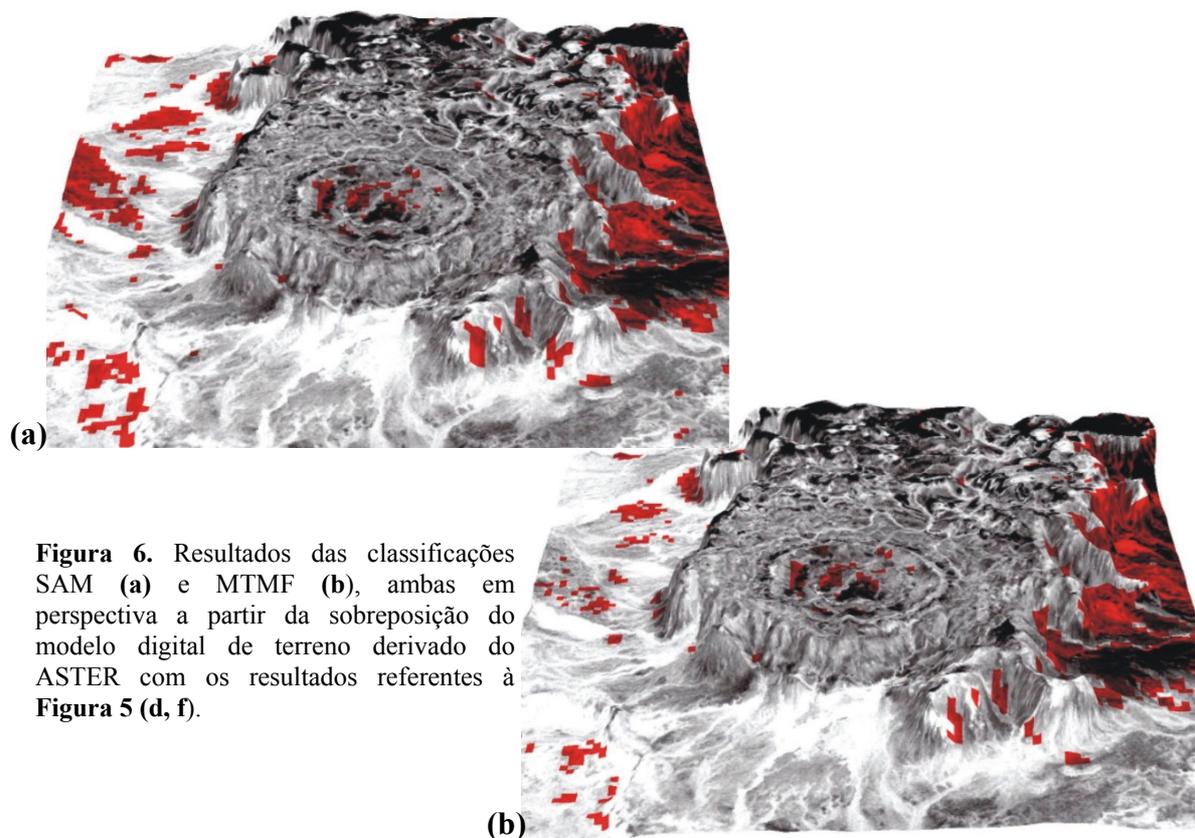


Figura 6. Resultados das classificações SAM (a) e MTMF (b), ambas em perspectiva a partir da sobreposição do modelo digital de terreno derivado do ASTER com os resultados referentes à **Figura 5 (d, f)**.

9. Discussão dos resultados e considerações finais

Os resultados apresentados nas **Figuras 5 e 6** mostram a potencialidade dos dados ASTER, posicionados no infravermelho termal (bandas 10 a 14), para mapeamento de silicatos, no caso quartzo, apesar da resolução espacial de 90 m que caracterizam as 5 bandas deste sensor. Estes resultados foram promissores na caracterização do núcleo central soerguido da estrutura de Tin Bider, aqui utilizada como estudo de caso, delimitando-se áreas com possíveis feições de impacto. Essas feições (e.g., *shatter cones*, PDFs etc) estão correlacionados a este núcleo central (como bem documentado em Koeberl, 1994), e que equivale ao arenito que encontra-se numa cota a 500 m acima da sua posição estratigráfica 'normal'. O mapeamento espectral do mineral quartzo é bem ilustrado na **Figura 6**, caracterizando, em perspectiva, os anéis internos da estrutura de Tin Bider como o arenito do Cretáceo Inferior soerguido durante o evento impactante. Este mineral foi bem delimitado também na porção leste, sendo um possível produto de erosão deste arenito sotoposto à 500 m.

A técnica razão de bandas e as classificações supervisionadas (SAM e MTMF) (**Figura 5**) forneceram produtos similares nesse mapeamento espectro-mineralógico de unidades ricas em quartzo, o que potencializa a aplicação deste conjunto de procedimentos em imagens ASTER para estudos de outras estruturas de impacto comprovadas ou àquelas ainda carentes de dados de confirmação. Com este método, visto pelo desempenho positivo deste estudo demonstrativo, áreas potenciais de unidades portadoras de feições de impacto podem ser previamente delimitadas como primeiro passo para posterior confirmação em campo.

Agradecimentos

A autora agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação científica (2004-2005).

Referências

Augusto, V. A.; Souza Filho, C. R.; Almeida-Filho, R. Processamento de imagens ASTER para detecção de áreas com microexsudações de hidrocarbonetos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 43., 2006, Aracaju, **Anais...**, Aracaju: 2006, p. 153.

Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In **Summaries, Fifth JPL Airbone Earth Science Workshop**. JPL Publication 95-1, v. 1, p. 23-26, 1995.

Ducart, D. F. **Caracterização de alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância**. 2004. 86 p. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2004.

Earth Impact Database. Disponível em: <<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>>. Acesso em: 01 nov. 2006.

French, B. M. **Traces of Catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures**. Houston, Lunar and Planetary Institute, 1998, 130 p.

Hook, S. J.; Gabel, A. R.; Green, A.A.; Kealy, P. S. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, p. 123-135, 1992.

Johnson, B. R. & Young, S. J. **In-Scene atmospheric compensation: application to SEBASS data collected at the ARM Site**. Technical report, Space and Environment Technology Center, The Aerospace Corporation, 1998.

Koeberl, C. African meteorite impact craters: characteristics and geological importance. **Journal of African Sciences**, n. 18, p. 263-295, 1994.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K.B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P.J.; Goetz, A. F.H. The Spectral Image Processing Systems (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145-163, 1993.

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

Pierazzo, E. & Collins, G. A brief introduction to hydrocode modeling of impact cratering. In: Claeys, P. & Henning, D. **Submarine Craters and Ejecta-Crater Correlation**. Nova York, Springer, 2003, p. 323-340.

Research & Systems Inc. **ENVI User's Guide**. ASPRS, Washington DC. 25p. (Suplemento). ENVI Version 4.0, September, 2003, 1084 p.