

## Discretização Espacial de Derrames Vulcânicos em Arequipa, Peru, por meio de Dados ASTER SWIR

Gustavo Macedo de Mello Baptista <sup>1</sup>

Edgar Roque Gutierrez Salinas <sup>2</sup>

Tati de Almeida <sup>1</sup>

Paulo Roberto Meneses <sup>1</sup>

José Oswaldo de Araújo Filho <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília - UnB/IG

Caixa Postal 4465 - 70910-900 - Brasília - DF, Brasil  
{gmbaptista, tati\_almeida, pmeneses, oswaldo}@unb.br

<sup>2</sup> Universidad Nacional San Agustin - UNSA

Av. Independencia s/n - Edificio Antiguo 3er. Piso - Arequipa, Peru  
gutiunsa@yahoo.es

**Abstract.** This article examines the spatial discretization of volcanic eruptions in the Misti volcano, Arequipa, Peru. For this, we used two scenes of ASTER SWIR sensor, one of radiance at the sensor (L1B) and another, a reflectance with atmospheric and crosstalk correction (AST\_07XT), dated March 17, 2008. For both scenes, we made the Principal Component Analysis transformation and selected PC-2, which was filtered with a 3 x 3 low pass and segmented into 8 classes with the rainbow color table, representing the 8 units identified in the field. In the radiance data, the bands 7 and 8 were the ones that contributed most to the composition of PC2. This is coherent, because in those bands we discovered spectral features of the main mineral found in Misti's lava flow. The bands 8 and 9 are the ones that most contributed to the composition of PC2 in a reflectance data. The band 9 is the one that contains the crosstalk problem. Another problem discovered in the reflectance data was the fact that all the eigenvectors of PC1 are negative, which reverses the relief. We didn't find any explanation to this fact in the literature. The results with radiance and reflectance data shows the same units, but it can be seen that radiance data showed greatest consistence with the eruptions than the reflectance data. The variation of 3400m in height between the city and the volcano's cone can be explained, because the topographical effects adopted in atmospheric correction eventually change the results in reflectance data.

**Palavras-chave:** Volcanic eruptions, ASTER, SWIR, erupções vulcânicas, ASTER, SWIR.

### 1. Introdução

A cidade de Arequipa, a segunda cidade mais importante do Peru, com uma população de aproximadamente 1 milhão de habitantes, localiza-se ao sul do país a uma altitude média de 2.300 na vertente sul da Cordilheira Ocidental dos Andes. Nas proximidades da cidade, três vulcões de idade Pleistocênica, Chachani, Misti e Pichu Pichu, alinham-se num trend noroeste-sudeste (N120) paralelo ao limite da Cordilheira Ocidental. O vulcão Chachani situa-se a 15 km a noroeste do Misti, e o vulcão Pichu Pichu a 20 km a sudeste. O Misti insere-se dentro de um sistema tectônico extensional e direcional formado por um conjunto de quatro falhas, as de direções oeste-noroeste ativas (Thouret et al.1995). É o vulcão com atividades mais recentes, Chachani é dormente e Pichu Pichu está extinto.

Em geral, a atividade hidrotermal se manifesta por um comportamento fumarólico com forte presença de enxofre. Os voláteis desprendidos na proximidade da superfície devem-se ao repentino esfriamento do meio, que possibilita a sublimação do enxofre e provavelmente de cálcio e magnésio, com forte odor sufocante. Atualmente o Misti apresenta uma atividade fumarólica leve (normal) de caráter ativo, com temperaturas externas entre 55°C a 75°C. A temperatura de superfície do domo, tomada em 01/07/1997 alcançou valores de 100°C a 230°C.

O centro da cidade de Arequipa está apenas a 17 km da caldeira do Misti, a qual está a uma altitude de 5822 metros acima do nível do mar (Figura 1). Cerca de dois terços da área

urbana de Arequipa está edificada sobre terrenos planos inconsolidados formados por leques vulcanoclásticos, e um terço da população habita próximo às drenagens que ascendem ao Misti, e por isso vivem sob os riscos de fluxos piroclásticos, *lahars* e inundações. O risco de um desastre de proporções incalculáveis é sempre eminente.

A área da região de Arequipa (*Departamento de Arequipa*) é parte de uma proposta de projetos de pesquisa geológica por meio de convênio de cooperação internacional celebrado no ano de 2009 entre os institutos geológicos da Universidade de Brasília (UnB) e de San Agustín de Arequipa (UNSA). As linhas de pesquisas têm como objetivos estudos geoambientais sobre riscos geológicos, mapeamento estrutural e pesquisa mineral, com o uso de imagens estereoscópicas do sensor PRISM e de radar do sensor PALSAR do satélite ALOS, e imagens de alta resolução espectral.

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados de um estudo que teve como objetivo principal investigar o desempenho das bandas do intervalo espectral de ondas curtas (SWIR) do sensor ASTER. Esse estudo visa discretizar espacialmente os derrames vulcânicos do vulcão Misti, separando os fluxos de lava dos fluxos piroclásticos, a partir de imagens de radiância no nível do sensor (L1B) e de reflectância com correção atmosférica e dos efeitos de *crosstalk* (AST\_07XT).



Figura 1 – Imagem ASTER VNIR composição R3G3B1 superposta ao DEM gerado a partir da estereoscopia (AST\_14DEM).

### 1.1 Geologia do Vulcão Misti

O Misti compreende dois edifícios vulcânicos: um estratovulcano erodido denominado Misti 1 (833-112 ka), parcialmente sobreposto por dois estratocones denominado Misti 2 e Misti 3 (112 ka e mais novo), e o topo atual do cone vulcânico Misti 4 (11ka e mais novo).

Thouret et al. (2001) realizaram um amplo estudo do posicionamento geológico e vulcânico do Misti e da estratigrafia e cronologia dos depósitos, baseado em mapeamento geológico e seções estratigráficas. O estratovulcano Misti 1 consiste de fluxo de lavas andesíticas intercamadas com finos sedimentos vulcanoclásticos, riolitos ignimbritos e depósitos detríticos de avalanche (LF1. RP1. DA1, Figura 2), totalizando pouco mais de 400 m de espessura. Apresenta reduzida área de afloramentos devido à sobreposição dos depósitos do Misti 2 e 3. Os estratocones Misti 2, 3, e 4 consistem de fluxos de lavas de composição traqui-andesíticas e detritos piroclásticos com 2,2 km de espessura. Os detritos piroclásticos

espalhados pelos cones moveram-se encosta abaixo a uma distância de 10 a 25 km da caldeira. Eles recobrem as encostas do Misti e formam uma extensiva planície anelar vulcanoclástica com área de 200 km<sup>2</sup>. Os depósitos incluem dois leques sobre os quais a cidade de Arequipa cresceu. O grupo basal do estratocone Misti 2 (LF2 Figura 2) consiste de fluxos de lavas muito viscosas, fluxos de bloco de lavas de domo (DC2 Figura 2), que formam frentes escarpadas e uma quebra na encosta na base do Misti 2 (2300-3899m) em direção a sul, sudoeste, este e noroeste, e extensos depósitos (>100 km<sup>2</sup>) de ignimbritos não compactados com espessura de 30 a 40 metros (NI2 Figura 2). A sucessão de rochas vulcânicas do Misti 2 eleva-se até as altitudes de 4000 a 4500m. Uma quebra de relevo acima de 4400m por colapso de caldeiras ou por um conjunto de grandes crateras separa os cones Misti 2 e Misti 3 a sul, leste e nordeste, onde o fluxo de lava do Misti 3 repousa discordantemente sobre os fluxos lava de blocos e domos do Misti 2. O estratocone Misti 3 foi construído por fluxos de lavas (LF3 Figura 2) e domos entre as alturas de 4400 e 5600 metros. Uma volumosa pilha com 30 a 50 metros de espessura de blocos e fluxos de cinzas dacíticas (BA3 Figura 2) recobrem extensa área no flanco sul-sudoeste e nordeste do Misti. O cone concêntrico Misti 4 é um cone formado por acumulações de fragmentos piroclásticos vesicular, vítrico e não cimentados (*cinder*) que recobrem parte oeste da caldeira (CC4 Figura 2). Atividades fumarólicas persistem.

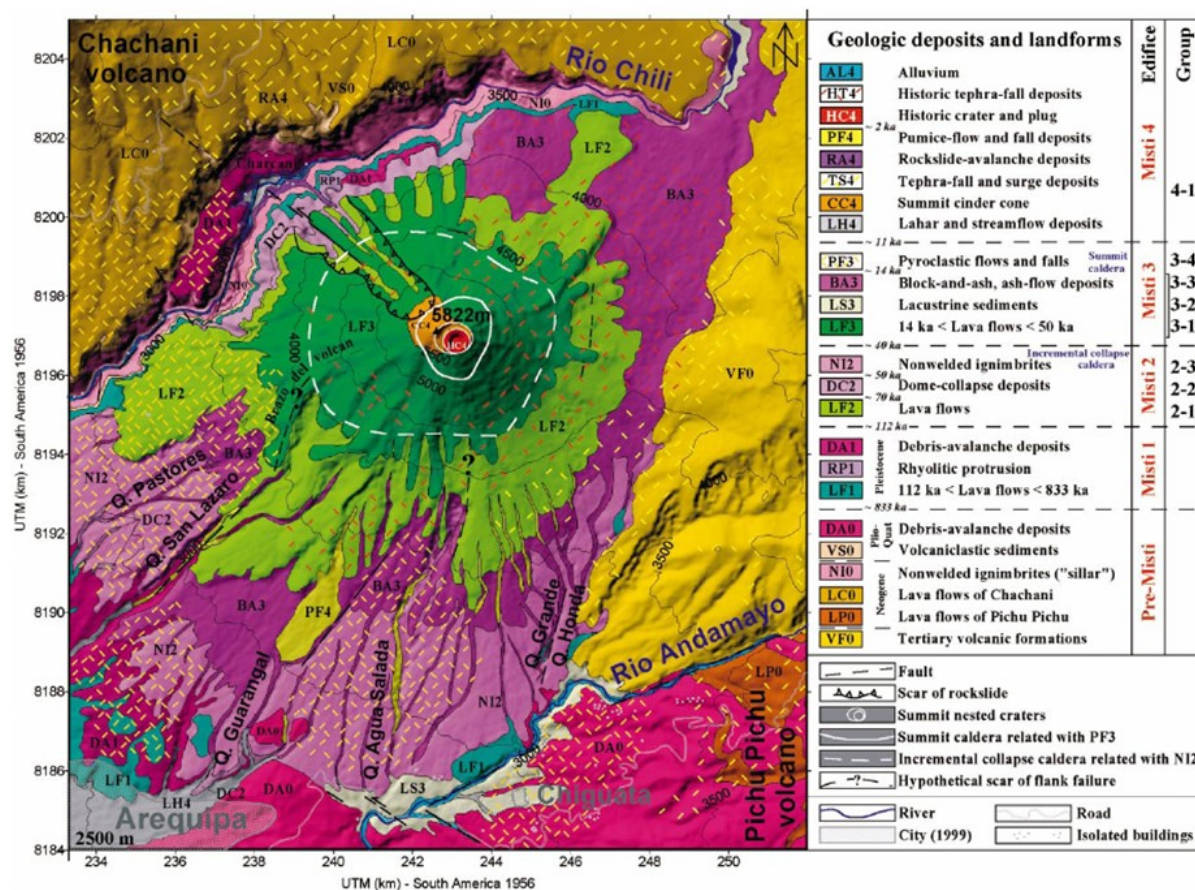


Figura 2 – Geologia do vulcão Misti (THOURET *et al.*, 2001)

Geoquimicamente o magma do Misti é homogêneo, prevalecendo quatro tipos de rochas: 2 piroxênios e anfibólio andesitos, anfibólio dacitos, anfibólio e biotita dacitos e biotita riolitos. As lavas do Misti 2 e Misti 3 mostram significantes mudanças de composição comparadas às lavas do Misti 1. A maioria das lavas calco-alcalinas contem de moderado a alto K<sub>2</sub>O andesitos (57,4% - 62,1% SiO<sub>2</sub>), dacitos (63,5% - 66,3% SiO<sub>2</sub>), e um pouco de

riolitos (71,7% - 72,8% SiO<sub>2</sub>). Análises químicas indicam que as lavas do Misti 2 - 4 evoluíram no tempo de sílica rica para sílica menos rica.

## 2. Material e Métodos

Para a realização do presente estudo foram obtidos dados de radiância no nível do sensor (L1B), reflectância com correção atmosférica e dos efeitos de *crosstalk* (AST\_07XT) e o DEM (AST\_14DEM), todos derivados dos dados brutos do sensor ASTER (L1A) da região de Arequipa datados de 17 de março de 2008. Essa data foi escolhida, pois a partir de abril de 2008 o sensor SWIR do ASTER deixou de funcionar devido ao superaquecimento ocasionado provavelmente pelo vazamento de radiação entre os detectores (*crosstalk*).

Os dados foram processados no ENVI© 4.7. Tanto os dados de radiância como os de reflectância foram transformados por meio da Análise de Principais Componentes. Adotou-se a PC2 para a discretização espacial e foram aplicados um filtro de passa-baixa 3x3 e uma tabela de cores (*rainbow*) e fusionando o resultado com a banda 3 do sensor VNIR do ASTER para melhorar a visualização, devido à resolução espacial de 15 m.

Para a análise das erupções do Misti, sem as interferências das erupções dos vulcões vizinhos, o Chachani (à esquerda) e o Pichu Pichu (à direita), foi estabelecida uma máscara determinada por digitalização em tela. Os resultados obtidos foram comparados com o mapeamento proposto por Thouret et al. (2001).

## 3. Resultados e Discussão

A análise de principais componentes permitiu discretizar diferentes fluxos de lava e piroclásticos. A PC2, na qual predominam as informações referentes ao contraste, foi escolhida após a análise dos auto-vetores, pois os principais minerais encontrados nas lavas vulcânicas do Misti apresentam suas feições centradas a 2,2  $\mu\text{m}$  devido à vibração molecular decorrente da ligação Al-OH e 2,3  $\mu\text{m}$ , por causa da ligação Mg-OH. A feição centrada a 2,2  $\mu\text{m}$  é encontrada na banda 7 do sensor SWIR, enquanto que a centrada a 2,3 é identificada na banda 8 (Figura 4).

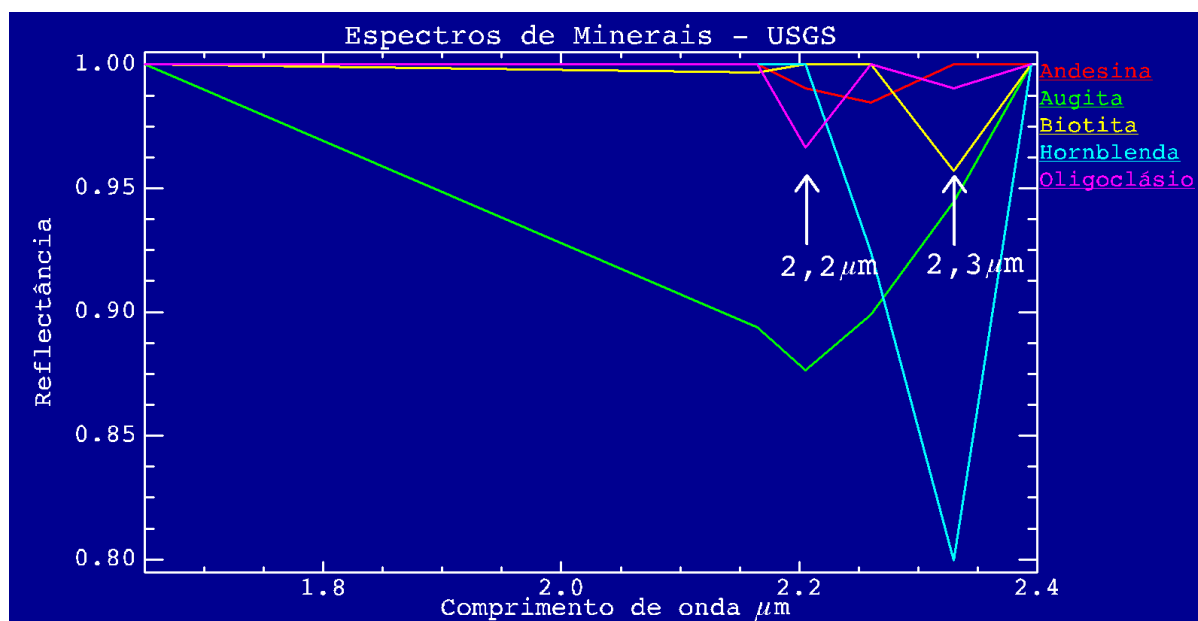


Figura 4 - Espectros dos minerais da Biblioteca Espectral do USGS encontrados nos fluxos de lava do Misti reamostrados para as bandas do ASTER com destaque para as feições centradas a 2,2 (Al-OH) e a 2,3 (Mg-OH)  $\mu\text{m}$ .

Na análise da tabela 1, que apresenta os auto-vetores obtidos a partir da transformação por APC na imagem de radiância no nível do sensor – L1B pode-se notar que as duas maiores contribuições, destacadas em vermelho, foram justamente as bandas 7 e 8, nas quais encontram-se as principais feições dos minerais encontrados nos derrames do Misti.

Tabela 1 - Auto-vetores obtidos a partir da APC sobre os dados L1B.

<i>Auto-vetores</i>	<i>Banda 4</i>	<i>Banda 5</i>	<i>Banda 6</i>	<i>Banda 7</i>	<i>Banda 8</i>	<i>Banda 9</i>
PC 1	0,912513	0,225184	0,228787	0,197736	0,138460	0,077452
PC 2	-0,383310	0,335334	0,371405	<b>0,461037</b>	<b>0,497324</b>	0,377885
PC 3	0,130353	-0,793404	-0,185633	0,093499	0,373055	0,413698
PC 4	-0,028056	-0,210141	0,787652	-0,566265	-0,030148	0,114422
PC 5	0,051002	0,398886	-0,393226	-0,633116	0,340581	0,408449
PC 6	0,003709	0,063902	-0,015249	0,134578	-0,690959	0,707202

A figura 4 apresenta a PC2 para os dados L1B, filtrada com passa-baixa 3x3 e com a paleta de cores *rainbow*. A discussão é feita da base em direção ao cume.

O estratovulcão Misti 1 (LF1 Figura 2), conforme salientado anteriormente, por apresentar reduzida área de afloramentos devido à sobreposição dos depósitos do Misti 2 e 3, não é percebido na porção SW como no mapa, mas apresenta-se com a cor vermelha na PC2, indicado pelo nº 1 na Figura 4 em manchas próximas à cidade de Arequipa.

Dentro do grupo basal do estratocone Misti 2 a PC2 discretizou o fluxo de lava muito viscosa (LF2 Figura 2) por meio das cores azul e púrpura, indicados pelo número 2 na Figura 4; os fluxos de bloco de lavas de domo (DC2 Figura 2) e extensos depósitos de ignimbritos não compactados (NI2 Figura 2) foram discretizado pelas cores verde e ciano, identificadas com o número 3 na Figura 4. A unidade NI2 apresentou um destaque para os ignimbritos dacíticos formada normalmente por rochas piroclásticas contendo plagioclásio ácido, que se destacam dos demais ignimbritos por serem rochas mais claras e por terem maior albedo e, portanto, discretizado em vermelho com o número 4 na Figura 4.

O estratocone Misti 3 construído por fluxos de lavas (LF3 Figura 2) e domos aparece com no cone com colorações ocre, verde escura e vermelha escuro, identificadas com o número 5 na Figura 4. A volumosa pilha de blocos e fluxos de cinzas dacíticas (BA3 Figura 2) aparece em vermelho mais escuro que o anterior desatacado com o número 6 na Figura 4, porém discretizou-se melhor a área do flanco nordeste do Misti.

O cone concêntrico Misti 4 (CC4 Figura 2) destacou-se em verde, indicado pelo número 7 na Figura 4. Destacam-se, também, na base em cor púrpura na sul-sudeste depósitos lacustres, indicados com o número 8 na Figura 4. Atividades fumarólicas persistem.

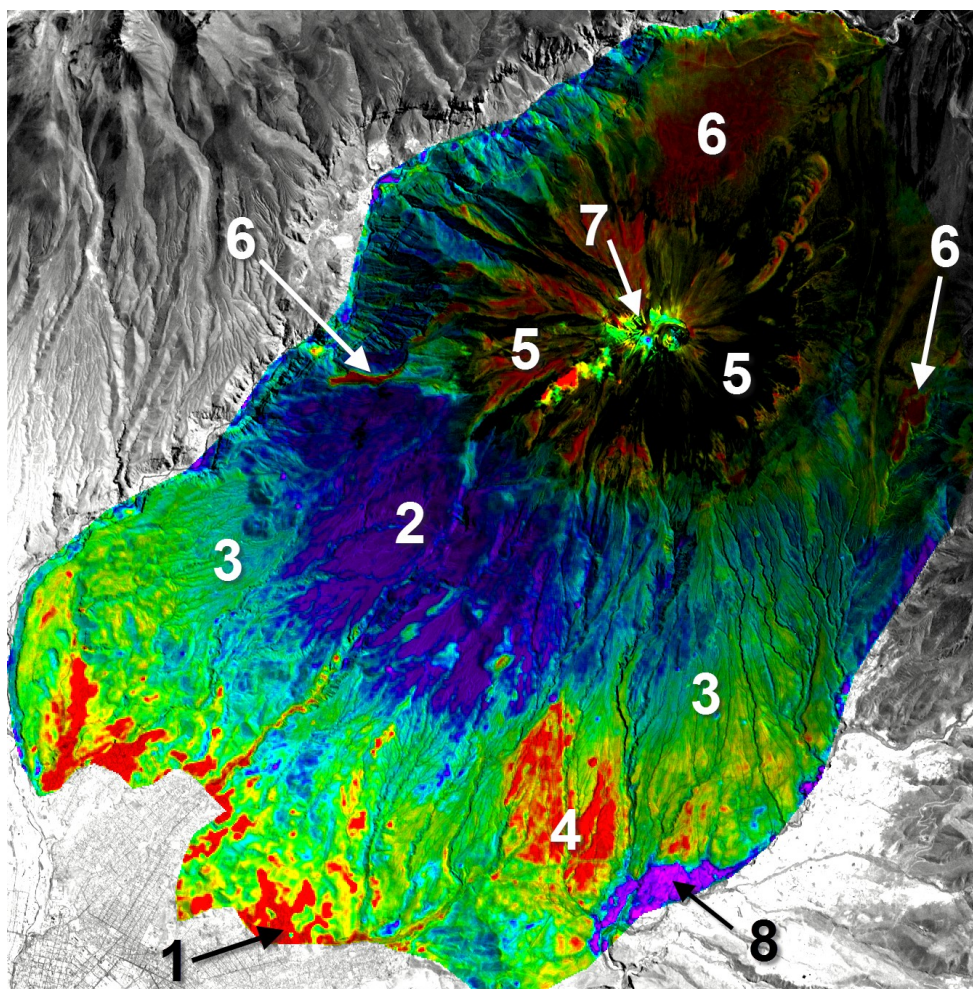


Figura 4 – PC2 da imagem L1B filtrada com passa-baixa 3x3 e com tabela de cores *rainbow*, fusionada com a banda 3 do sensor VNIR do ASTER.

Com a utilização do DEM foi possível verificar que as unidades discretizadas pela PC2 de radiância possuem coerência com a topografia. A figura 6 apresenta a PC2 filtrada com passa-baixa 3 x 3, com a tabela de cores *rainbow* e fusionada com a banda 3 do VNIR, numa visada oblíqua no sentido SW-NE com a cidade de Arequipa em primeiro plano em níveis de cinza e as unidades supracitadas discretizadas espacialmente.

Os dados obtidos com o mesmo processamento da PC2 da imagem de reflectância (AST\_07XT) (Figura 5) foram similares aos obtidos com os dados da L1B, porém, na análise dos auto-vetores (Tabela 2), as bandas que mais contribuíram para formação da segunda componente, foram as bandas 8 e 9, sendo que a banda 9 é a que apresenta de forma mais significativa o problema do *crosstalk*.

Ou seja, as bandas de absorção centradas a 2,2  $\mu\text{m}$  decorrentes da presença da feição da ligação Al-OH não foram tão contempladas, como as centradas a 2,3  $\mu\text{m}$ , o que levou a um menor albedo dos ignimbritos dacíticos, pois a albita e o oligoclásio que apesar de apresentam feições a 2,3  $\mu\text{m}$ , tem suas feições mais importantes centradas a 2,2  $\mu\text{m}$ . O que aparecem em vermelho (maiores valores de albedo) no número 4 da Figura 4, na Figura 5 aparece com predomínio do amarelo, ou seja, foram menos destacados que nos dados de radiância.

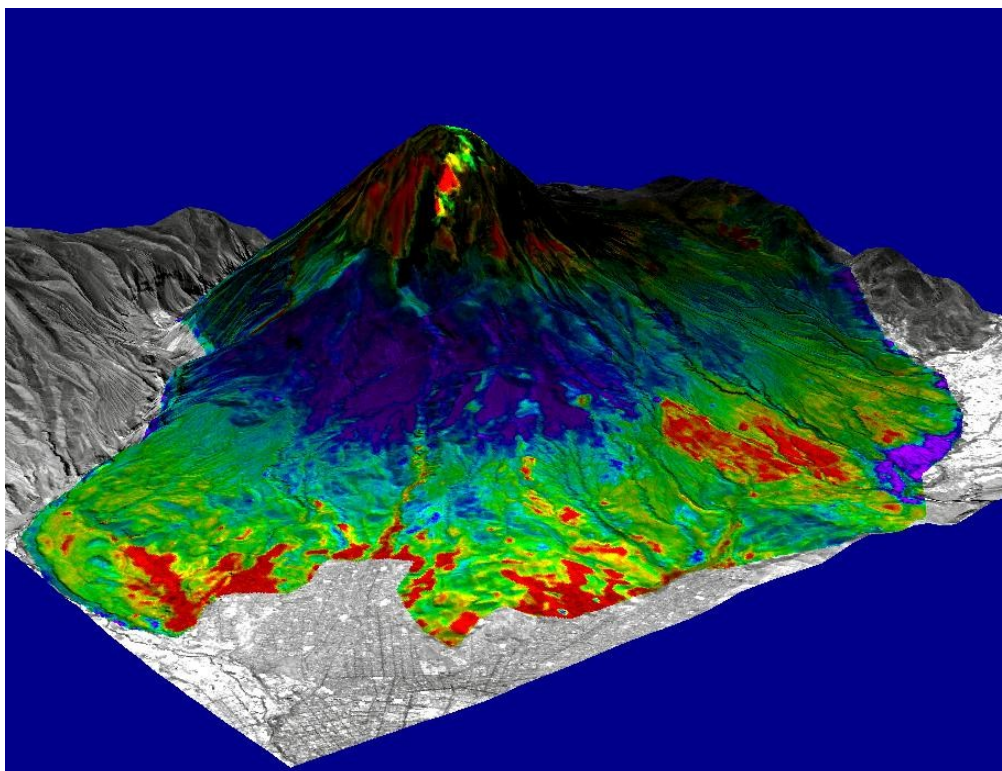


Figura 5 - Representação tridimensional das unidades de derrames lávicos do Misti, por meio de dados de radiância no nível do sensor (L1B).

Outro aspecto que pode ser observado nessa (Tabela 2) e em outras cenas do AST\_07XT, em imagens ASTER corrigidas com FLAASH e imagens Landsat corrigidas com o apoio de dados de campo é que todas, quando submetidas à transformação APC apresentam auto-vetores negativos na formação da PC1, o que “inverte” o relevo, pois inverte o albedo, que a informação mais importante obtida na primeira componente. Apesar de extensa busca, não se encontrou explicação na literatura para tal fato.

Tabela 2 - Auto-vetores obtidos a partir da APC sobre os dados AST 07XT.

<i>Auto-vetores</i>	<i>Banda 4</i>	<i>Banda 5</i>	<i>Banda 6</i>	<i>Banda 7</i>	<i>Banda 8</i>	<i>Banda 9</i>
PC 1	-0,504565	-0,371219	-0,397129	-0,379050	-0,379208	-0,403016
PC 2	-0,748239	0,011093	-0,059072	0,111496	<b>0,354707</b>	<b>0,546148</b>
PC 3	0,269504	-0,029926	-0,188072	-0,487443	-0,394812	0,705424
PC 4	0,270237	-0,475865	-0,634981	0,516511	0,117097	0,129721
PC 5	0,131420	-0,717800	0,395466	-0,349033	0,434241	0,026631
PC 6	0,150403	0,345679	-0,493795	-0,466562	0,610107	-0,155372

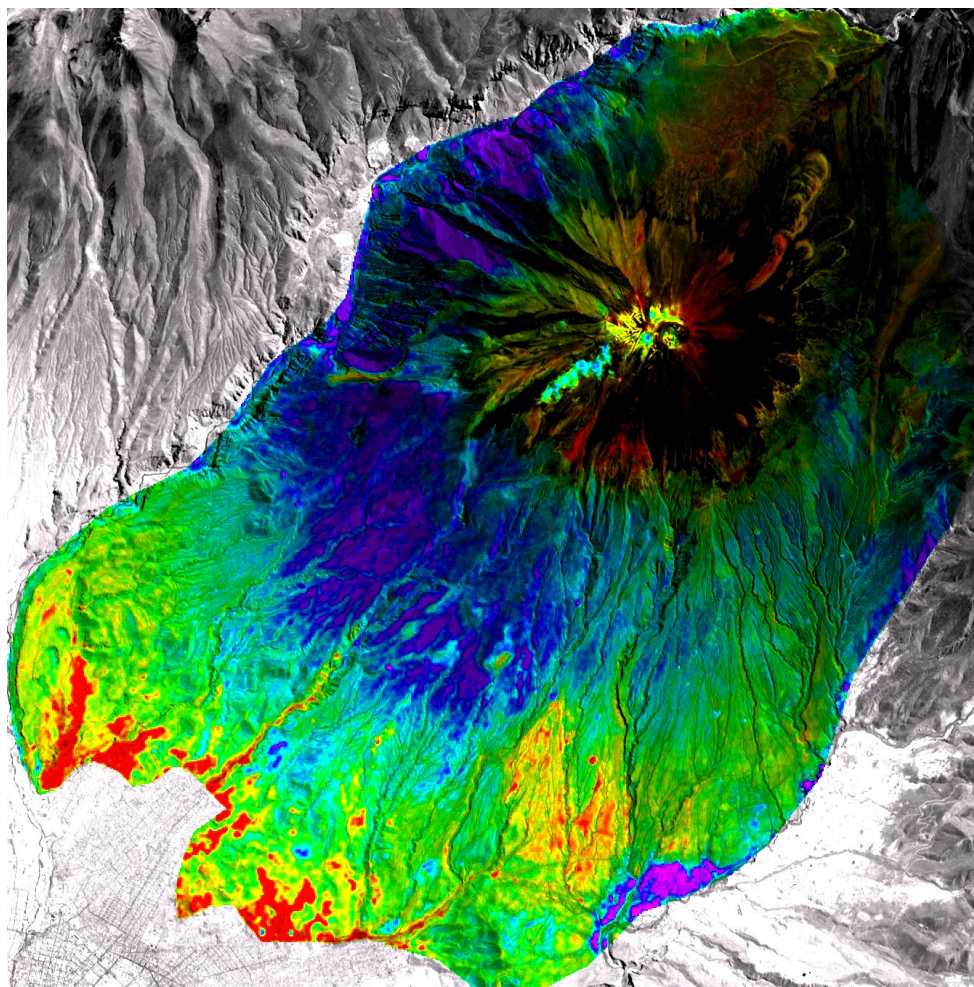


Figura 4 – PC2 da imagem AST\_07XT filtrada com passa-baixa 3x3 e com tabela de cores *rainbow*, fusionada com a banda 3 do sensor VNIR do ASTER.

#### 4. Conclusões

A Análise de Principais Componentes sobre os dados ASTER de radiância no nível do sensor e de reflectância corrigida para os efeitos atmosféricos e de *crossstalk* permitiram discretizar espacialmente os derrames vulcânicos do Misti.

A PC2 dos dados de radiância foi composta prioritariamente pelas bandas 7 e 8 nas quais se encontram as feições dos principais minerais encontrados nos derrames. Já a PC2 dos dados de reflectância foi composta principalmente pelas bandas 8 e 9 que é a banda que apresenta maior comprometimento pelo *crossstalk*. Por isso, os minerais que apresentam suas feições decorrentes da ligação Al-OH não foram tão bem discretizados. A PC1 dos dados de reflectância apresentou todos os auto-vetores com valores negativos, o que “inverteu” o relevo. Não se encontrou explicação na literatura para tal fato.

Novos estudos de investigação mineralógica por meio dos dados ASTER devem ser incentivados visando uma melhor compreensão dos derrames vulcânicos do Misti.

#### Referências Bibliográficas

Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M. Legeley-Padovani, A.; Suni, J.; Frechen, M. Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. **GSA Bulletin**, v. 113, n. 12, p. 1593-1610, 2001.