

Identificação de minerais de titânio na Região do Bojuru, São José do Norte, RS - Brasil, com técnicas de espectroscopia de reflectância

André Bilibio WESTPHALEN^{1,2}, Dejanira Luderitz SALDANHA¹, Jean Marcel de Almeida ESPINOZA², Lauro Júlio CALLIARI³ y Maurício Soares ORTIZ^{1,2}

Abstract: IDENTIFICATION OF TITANIUM MINERALS IN THE REGION OF BOJURU, SÃO JOSÉ DO NORTE, RS - BRAZIL, WITH TECHNIQUES OF REFLECTANCE SPECTROSCOPY.

This paper determines the identification of titanium (Ti) found along the coastal region of Rio Grande do Sul through the spectral classification of satellite images of the Hyperion sensor. As a contribution, it demonstrates the possibility of building mineral mapping using satellite data for coastal areas without vegetation cover. The methodology steps were: 1) bibliographic review to determine concentration values typical of the mineral of interest; 2) selecting from a spectral library of signatures minerals of interest; 3) determination of the features characteristic for minerals of interest, generating endmember files; 4) obtaining and pre-processing of hyperspectral data from Hyperion to the study area; 5) reducing the dimensionality of the hyperspectral data analyzed in order to avoid redundancy and excess processing; 6) comparing the selected and endmembers this spectral response for each pixel of the image by using the spectral comparison technique known as first-derivative; 7) determination of the presence of minerals of titanium maps for the analyzed area; and 8) comparison between the results and those described in the literature. From this method, they built up thematic images indicating the presumed presence mineral per pixel, represented in scale concentration. The work exposed the use of orbital sensor data as an important mining support tool as well as the mapping of mineral resources over large areas and discoveries, with the coastal zones.

Resumo: Este trabalho determina a identificação de minerais do titânio (Ti) presente ao longo da faixa litorânea do Estado do Rio Grande do Sul através da classificação espectral de imagens orbitais do sensor Hyperion, a partir dos atributos espectrais desses minerais. Como contribuição, este estudo demonstra a possibilidade de construção de mapeamentos minerais através de dados orbitais para zonas litorâneas sem cobertura vegetal. A metodologia empregada se consistiu em: 1) Revisão bibliográfica para determinar os valores típicos de concentração do mineral de interesse; 2) selecionar a partir de uma biblioteca espectral de minerais as assinaturas de interesse; 3) determinação das feições características para os minerais de interesse, gerando arquivos de *endmember*; 4) obtenção e pré-processamento de dados hiperespectrais do sensor Hyperion para área de estudo; 5) redução da dimensionalidade dos dados hiperespectrais analisados a fim de evitar redundância e excesso de processamento; 6) comparação entre os *endmembers* selecionados e a resposta espectral presente em cada pixel da imagem com o uso da técnica de comparação de espectros conhecida como derivada primeira; 7) determinação dos mapas de presença de minerais do titânio para a área analisada; e, 8) comparação entre os resultados encontrados e os descritos na literatura. A partir deste método, construíram se imagens temáticas indicando a presença mineral presumida por pixel, representada em escala de concentração. O trabalho expôs o uso de dados de sensores orbitais como importante ferramenta de apoio a mineração bem como ao mapeamento de recursos minerais em áreas extensas e descobertas de vegetação, como a faixa litorânea gaúcha.

¹) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

²) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul- IFRS.

³) Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

e-mail: andre.westphalen@riogrande.ifrs.edu.br

Palavras chaves: Hyperion. Mapeamento mineral. Espectroscopia.

Key words: Hyperion. Mineral mapping. Spectroscopy.

Introdução

A identificação e mapeamento de recursos minerais baseada em dados, pode ser utilizada como suporte a exploração mineral ao permitir a cobertura de vastas áreas a baixo custo. No caso específico da porção litorânea gaúcha com interesse mineral (região do distrito do Bojuru, município de São José do Norte), mapeamentos minerais de campo já foram realizados por Tomazelli (1978), Corrêa (1990) e Corrêa *et al.* (2006), dando enfoque principal aos depósitos de minerais pesados da plataforma continental sul-brasileira.

No que tange a mineração comercial, os principais focos presentes na área analisada são as *fosforitas*, onde Klein *et al.* (1992) exibiram a ocorrência de nódulos fosfáticos na margem continental do Rio Grande do Sul, as crostas cobaltíferas, expostas por Tomazelli (1978) e Corrêa *et al.* (2006) e, o foco principal deste trabalho, o conjunto de minerais pesados notadamente presentes nas areias praias da região do Bojuru (Tomazelli, 1978; Munaro, 1994; Corrêa *et al.*, 2001, Dillenburg *et al.*, 2004). Estes minerais pesados, em especial aqueles que contêm altos teores de titânio, tem grande interesse econômico devido sua esparsa presença mundial e difícil obtenção. Além disto, o fato de ser o titânio um material largamente utilizado em itens de ponta em engenharia e eletrônica faz com que o interesse na mineração desta região seja acentuado.

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais, de forma a possibilitar que de cada um dos pixels das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa, recebe o nome de sensoriamento remoto hiperespectral (*hyperspectral remote sensing*) (Jensen, 2009). Estes espectros extraídos podem ser comparados diretamente com espectros medidos no campo ou em laboratório através de técnicas de comparação multidimensional. Como técnicas mais consoli-

dadas para a interpretação e classificação de dados hiperespectrais podemos citar a análise por componentes principais, a classificação por angulação entre espectros, SAM – Spectral Angle Mapper (Espinoza, 2006; Curran, 1994) e a técnica de comparação por derivadas de espectros (Espinoza, 2006; Curran, 1994). Aspectos de terreno como cobertura vegetal e umidade podem alterar drasticamente o desempenho destes métodos, o que leva a uma melhor aplicação em áreas descobertas como desertos e zonas praias.

Este trabalho objetiva empregar a técnica de classificação hiperespectral de comparação de espectros através da derivada primeira (Espinoza, 2006; Curran, 1994) em um conjunto de imagens multiespectrais do sensor Hyperion para o mapeamento da abundância de minerais pesados (ligados ao titânio) ao longo da faixa litorânea gaúcha.

A área de estudo demonstrada na figura 1, constitui-se como uma parcela da margem continental do sul do Brasil, conhecida como litoral médio gaúcho. Esta área (com coordenadas centrais de aproximadamente 31° e 51° de latitude sul) está inserida ao território do município de São José do Norte/RS, e tem como principais atividades a agricultura e a pecuária.

Nesta região, a planície costeira varia entre 20 e 80 km extensão, responsável por depositar grandes cargas minerais junto as areias praias ao longo do tempo (Munaro, 1994). O clima local possui com temperaturas médias de 26° no verão e 12° no inverno, com precipitações oscilando entre 1000 e 1500 mm, sendo uniformemente distribuídas por todo o ano (Munaro, *op cit*).

Segundo Villwock y Tomazelli (1998), na região costeira em estudo, o nível do mar alcançou na última transgressão pós-glacial aproximadamente 4 a 5 metros acima do nível atual, e possibilitou a formação de uma barreira transgressiva que progradou durante a fase regressiva que se seguiu. Essa progradação desenvolveu-se principalmente através da construção de cordões litorâneos (Barreira IV). As areias praias

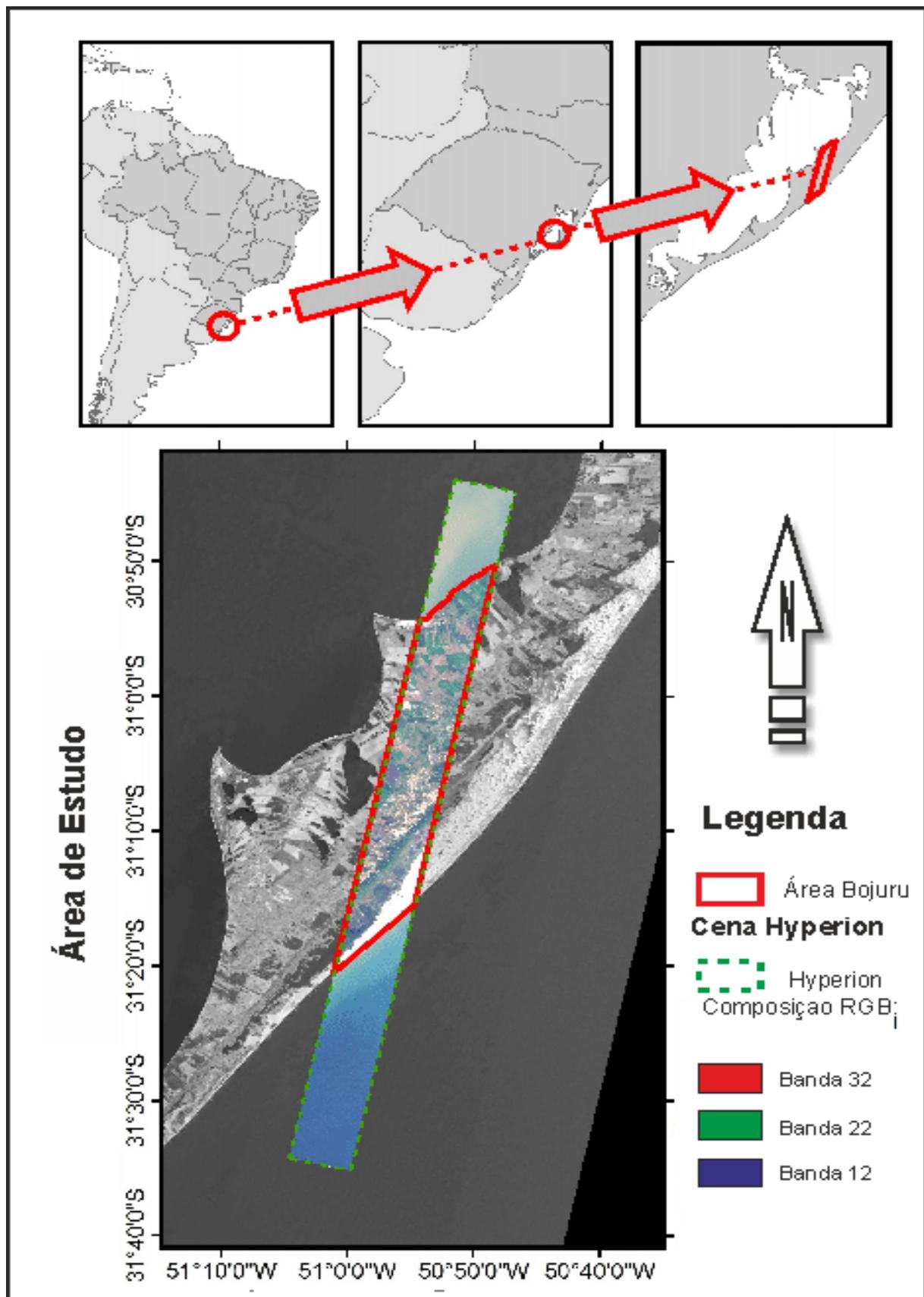


Figura 1. Localização da área de estudo. / Figure 1. Location of the study area.

da Barreira IV são quartzosas, de granulação fina a muito fina e apresentam elevadas concentrações de minerais pesados.

Metodologia

O presente trabalho empregou em seu desenvolvimento o princípio físico do comportamento espectral de alvos, onde considerase que cada alvo específico possui uma maneira particular de interagir com a radiação eletromagnética uma forma única de refletir, absorver e transmitir as radiações eletromagnéticas que recebe. Assim, por exemplo, um dado mineral possui uma forma única de interagir com a radiação eletromagnética, possuindo então uma assinatura espectral.

Com esse princípio, buscou-se identificar a presença dos minerais de interesse (e.g, Rutilo e Ilmenita) a partir da comparação das assinaturas espectrais de referência para esses minerais, obtidas via biblioteca espectral do serviço geológico americano (i.e., USGS), e as assinaturas espectrais encontradas ao longo da área de estudo. Com isso, determinou-se a presença mineral de forma indireta, via a análise comparativa entre os espectros de referência (i.e., biblioteca espectral) e os espectros da imagem (i.e., medidos para um dado pixel), seguindo os passos metodológicos expressos resumidamente pela figura 2.

Como passo inicial nesse processo, se deu a coleta da imagem orbital do sensor hiperespectral Hyperion, contendo 242 bandas espectrais e as assinaturas espectrais para os minerais de referência, ambas obtidas

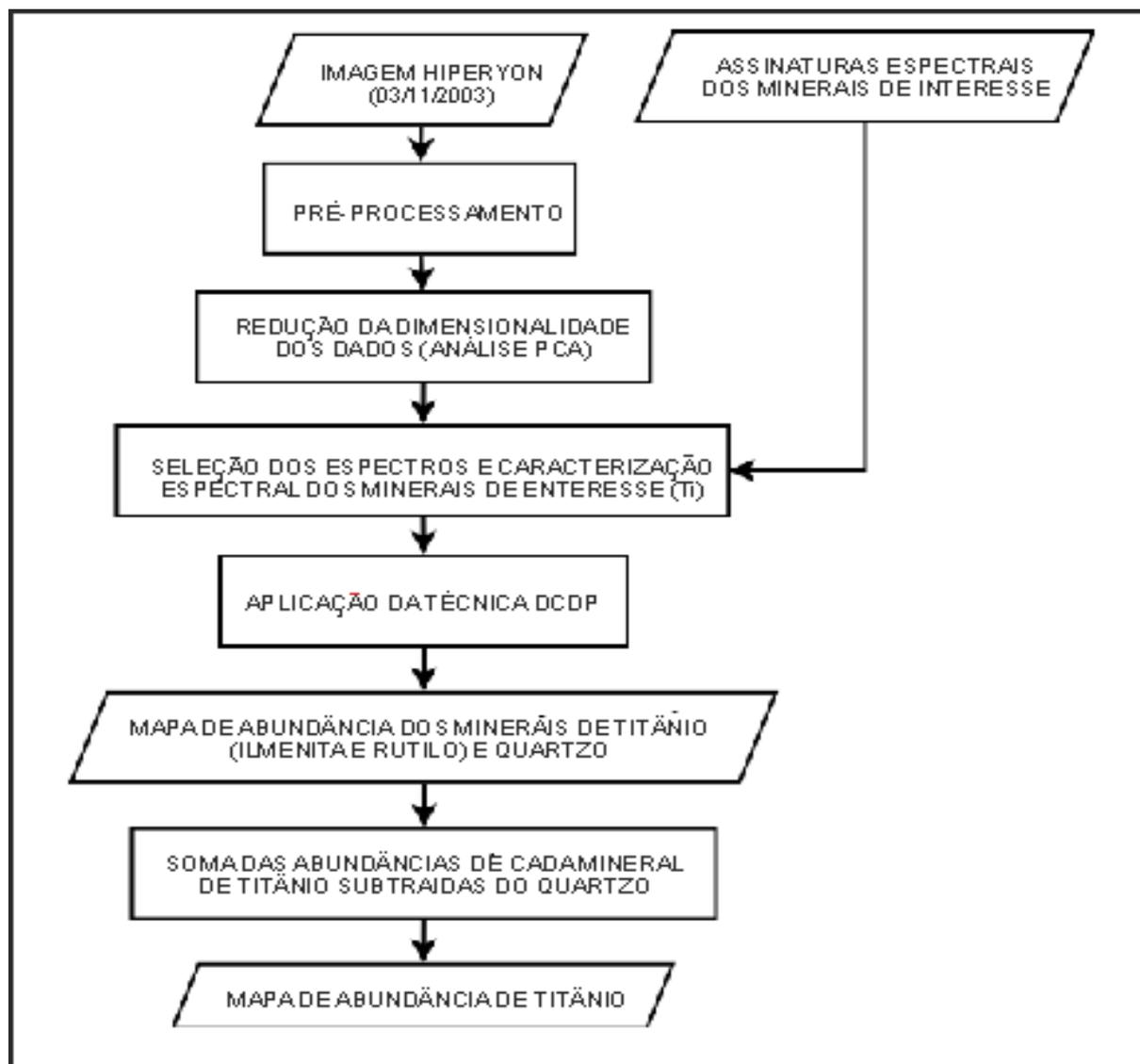


Figura 2. Fluxograma metodológico. / Figure 2. Methodological flowchart.

via repositório digital do serviço geológico americano (USGS). Em sequência, empregaram-se os passos de pré-processamento desses dados, o que consistiu em adequar seus formatos e resoluções, bem como reduzir os ruídos inerentes de suas coletas.

No pré-processamento da imagem Hyperion, foi empregado o processo de correção atmosférica e transformação dos valores dos pixels dos valores originais representados em números digitais (NDs) para reflectância, necessário para comparação entre as imagens e os espectros de laboratório. Todos os processos de pré-processamento através do software ENVI®.

Sequencialmente, foi executada a redução da dimensionalidade dos dados Hyperion por meio da técnica de componentes principais (PCA), reduzindo assim a redundância dos dados, bem como permitindo a seleção de feições espectrais (i.e., bandas de alta absorção) que caracterizam os alvos de interesse. Com isso, foi aplicada a caracterização espectral das amostras de referência coletadas a partir da biblioteca espectral do USGS, com o objetivo de selecionar espectros de referência dos minerais de interesse (e.g., Rutilo e

Ilmenita). Assim, foram obtidos dois conjuntos de dados com resolução semelhante: (1) Imagem hyperion recortada e pré-processada para a área de estudo e (2) assinaturas espectrais dos minerais de interesse ajustadas à resolução espectral da imagem Hyperion (i.e., número correspondente de bandas).

Com os dois conjuntos de dados obtidos, foi aplicada a comparação matemática entre as curvas espectrais, buscando identificar as semelhanças presentes. Para tanto, foi empregado um conjunto de técnicas conhecidas como análise de espectros através da Decomposição de Curvas por meio da Derivada Primeira (DCDP). De forma geral, esta técnica de classificação hiperespectral se baseia na análise da similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência, ou *endmembers*, e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem. A metodologia do processamento hiperespectral utilizada foi proposta por Curran (1994) e implementada em trabalhos por Espinoza (2006), Boardman *et al.* (1995) e Kruse *et al.* (1996), aqui aplicada através do software Matlab®.

A técnica de Decomposição de Curvas por

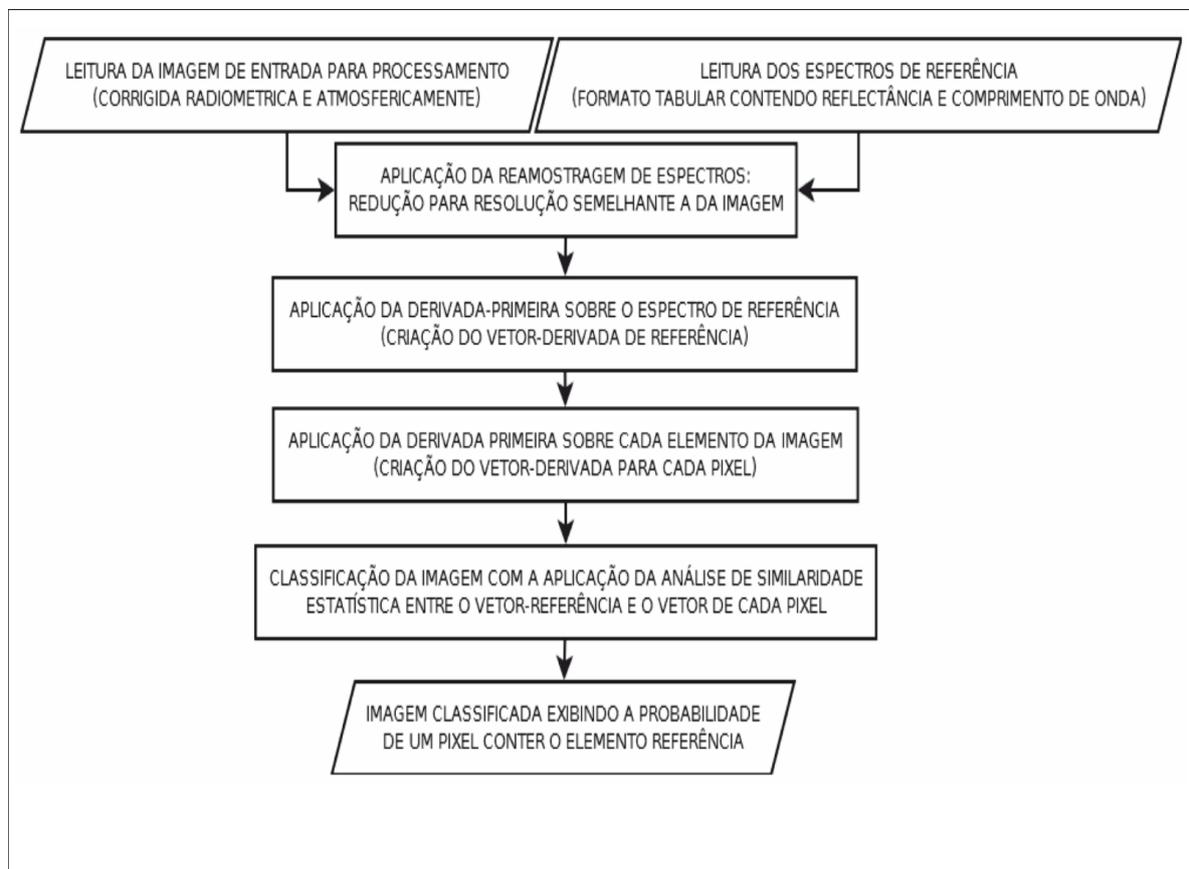


Figura 3. Fluxograma da sequência de processos para a aplicação do DCDP. / **Figure 3.** Flowchart of the sequence of processes for the application of DCDP.

meio da Derivada Primeira (DCDP) seguiu os passos sequenciais descritos no fluxograma da figura 3.

Como resultado do emprego da DCDP se obteve uma imagem indicando a semelhança espectral

entre os espectros de referência e os espectros presentes na imagem. Assim, construiu-se uma imagem de presença de cada mineral de titânio estudados. Por fim, como forma de ampliar o contraste das imagens de

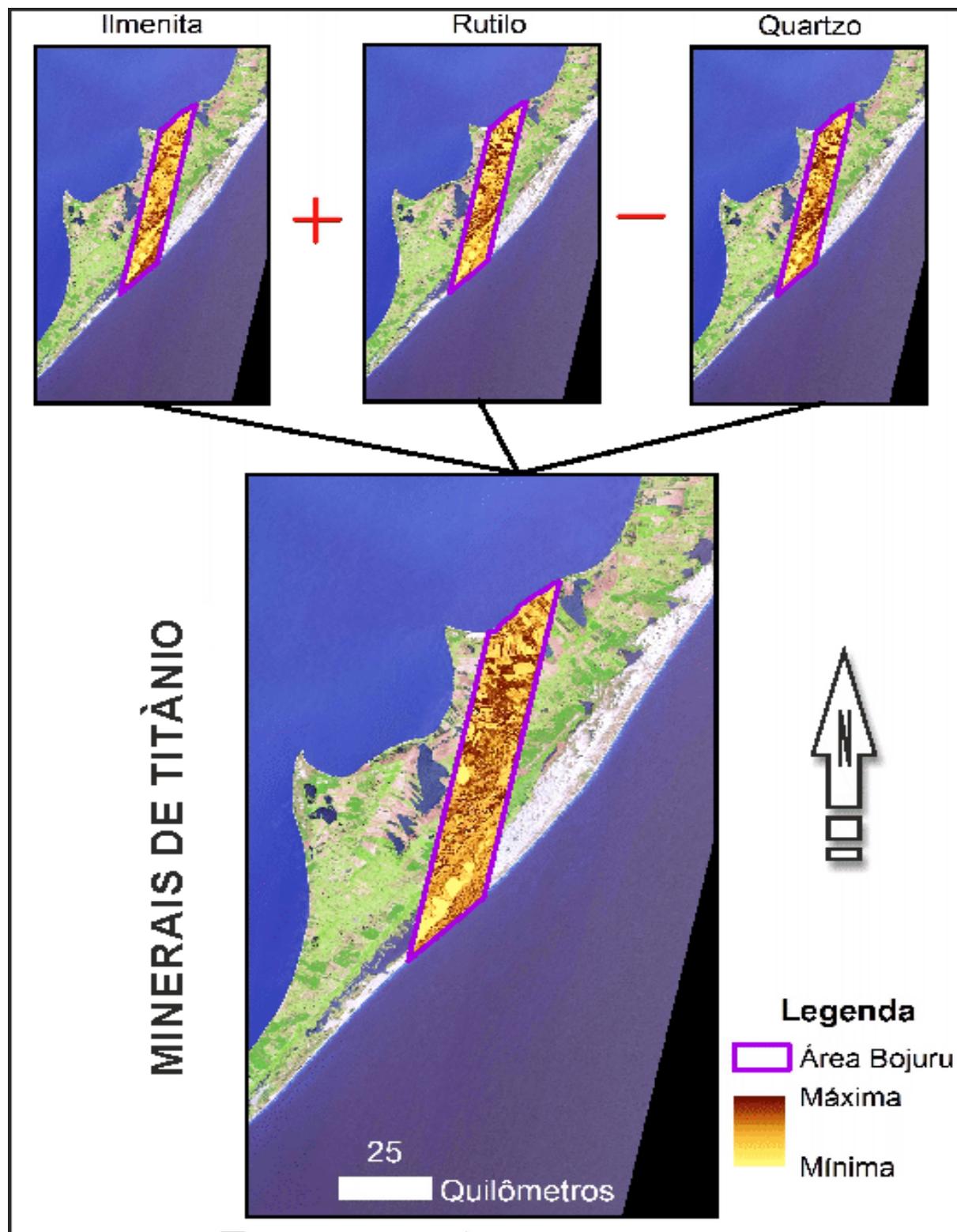


Figura 4. Imagem classificada do mapeamento de titânio – apenas com as áreas de titânio acima do background. / Figure 4. Titled image of titanium mapping - only with the titanium areas above the background.

resultado, bem como reduzir os efeitos de suavização ocasionados pelo material de fundo, subtraíase a presença de quartzo, um dos principais constituintes da cobertura do solo local. A técnica empregada trouxe como vantagens o fato de evitar erros de escala entre os espectros comparados por conta de distintas iluminações. Isto ocorre porque ao efetuar o cálculo das derivadas, a técnica compara os espectros através dos sinais das derivadas e não através de seus valores, o que significa comparar a forma dos espectros ao invés de comparar seus valores.

Resultados e discussões

Os resultados obtidos da análise espectral permitiram a identificação da presença e concentração de titânio ao longo da área de estudo.

Uma análise comparativa entre os espectros reamostrados para a resolução espectral do Hyperion após a seleção de bandas por análise por componentes principais (PCA) mostra que a coincidência entre os espectros associados a cada pixel das imagens e os espectros de laboratório possui alta correlação para áreas com alta densidade de titânio ($R^2 = 91,36\%$). Estes dados de espectroscopia de reflectância de campo em conjunto com as análises laboratoriais constituíram arquivos de verdade de campo utilizados posteriormente para validar os resultados obtidos com a classificação espectral.

A comparação entre o mapeamento de titânio (figura 4) obtido pela técnica DCDP e a de campo, exibiu forte correlação, com um índice de acurácia kappa (k) de 96% e um índice de significância R^2 da ordem de 94%. O mapeamento mineral de minerais pesados, em especial do titânio com dados Hyperion foi satisfatório com relação à identificação geral das concentrações observadas em campo, ficando exposta a limitação da prospecção em áreas vegetadas e/ou cobertas por água (áreas não classificadas).

As zonas de maior coincidência entre o vetor referência e o vetor de cada pixel representam-se como áreas de maior coincidência estatística, exibindo maior valores para o índice R^2 . A exemplo, zonas com coincidência entre as inflexões das derivadas do vetor de referência e o

vetor de um pixels acima de 90% determina este pixel como um elemento com 90% ou mais de probabilidade de pertencer a classe correspondente a o vetor de referência.

Conclusões

Os resultados encontrados no trabalho apontam o uso concomitante de imagens Hyperion e da técnica DCDP como uma forma robusta de mapeamento mineral em áreas expostas, apresentando valores expressivos com acertos acima de 90% para área analisada. Considerando as características do elemento químico analisado neste trabalho, fica evidente a possibilidade da caracterização espectral das mesmas e o posterior emprego dessa caracterização para classificação de imagens orbitais Hyperion como forma de apoio ao trabalho geológico de campo. Resultados diferenciados devem ser esperados quando consideramos a dinâmica da reflectância de áreas com cobertura vegetal pronunciada, devido a influência da vegetação e problemas como o sombreamento diferenciado em função da variação do ângulo de incidência solar, como por exemplo, a determinação do grau de pureza dos pixels classificados na imagem, tentando evitar conflitos de classificação como a sobreposição rocha/sombras e os falso-positivos na classificação.

References

- Boardman, J.W., Kruse, F.A. y Green, R.O. 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, 5, Pasadena, CA. Summaries, JPL Publication 95 (1): 23-26.
- Corrêa, I.C.S. 1990. Analyse morphostructurale et evolution paleogeographique de la plateforme continentale atlantique sud-bresilienne (Rio Grande do Sul-Brésil). *Tese de Doutorado*. Université de Bordeaux I. Talence-França. 314.
- Corrêa, I.C.S., Zouain, R.N.A.; Weschenfelder, J. y Tomazelli, L.J. 2006. Heavy minerals from south Brazilian continental shelf to North Argentina: distribution and provenance. *Congreso Latinoamericano de Sedimentología*, 4. San Carlos de Bariloche, Rio Negro-Argentina. Resúmenes, 79.

- Curran, P.J. 1994. Imaging spectrometry - its present and future role in ENVI®ronmental resarch. In J. Hill and J. Megier (ed.) *Imaging spectrometry - a tool for ENVI®ronmental observations*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. *Remote Sensing of Environment*, 39: 153-166.
- Dillenburg S.R., Tomazelli L.J. y Barboza E.G. 2004. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Marine Geology*, 203: 43-56.
- Espinoza, J.M.A. 2006. Caracterização espectral das rochas constituintes dos rejeitos de garimpo de pedra ametista - região de Ametista do Sul, Rio Grande do Sul. 126. *Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Pós-Graduação em sensoriamento remoto*, UFRGS, Porto Alegre.
- FLAASH "User's Guide". Disponível no site: <http://www.rsinc.com/ENVI®/>, Disponível em: 01/11/2016.
- Klein A.H.F., Griep G.H., Calliari L.J., Villwock J.A. 1992. Concentrações fosfáticas no terraço do Rio Grande. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 37, São Paulo. Resumos expandidos, São Paulo: [s.n.] 202-203.
- Kruse, F.A.; Huntington, J.H. y Green, R.O. 1996. Results from the 1995 AVIRIS geology group shoot. *Proceedings 2nd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 1: 211-220.
- Munaro, P. 1994. Geologia e mineralogia dos depósitos de minerais pesados de Bojurú. 1994. 90f. *Dissertação (Mestrado em Geociências)-Pós-Graduação em Geociências*, UFRGS, Porto Alegre.
- Tomazelli, L.J. 1978. Minerais pesados da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, estudos Tecnológicos-UNISINOS, São Leopoldo-RS, Brasil, 2(5): 103-159.
- Villwock, J.A. y Tomazelli, L.J. 1998. Holocene Coastal Evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Quaternary of South America and Antartic Peninsula*. A. A. Balke-ma, Rotterdam. 11: 283-296.

Recibido: 07 de Noviembre del 2016

Aceptado: 12 de Abril del 2017