



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA VOLTADA ÀS ÁREAS
FOSFATADAS DA REGIÃO DE COROMANDEL-MG VISANDO A
LOCALIZAÇÃO DE NOVOS ALVOS EXPLORATÓRIOS**

Lucas Santos Batista Teles

MONOGRAFIA

BRASÍLIA

2018



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

Lucas Santos Batista Teles

**CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA VOLTADA ÀS ÁREAS
FOSFATADAS DA REGIÃO DE COROMANDEL-MG VISANDO A
LOCALIZAÇÃO DE NOVOS ALVOS EXPLORATÓRIOS**

**Monografia de especialização em
Geoprocessamento Ambiental apresentada a
banca examinadora do Instituto de Geociências
como exigência para a obtenção do título de
especialista em Geoprocessamento**

Aprovada em 16/03/18

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Tati de Almeida (Orientadora)

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses

Prof^a. Dr^a. Suzan Waleska Pequeno Rodrigues

CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA VOLTADA ÀS ÁREAS FOSFATADAS DA REGIÃO DE COROMANDEL-MG VISANDO A LOCALIZAÇÃO DE NOVOS ALVOS EXPLORATÓRIOS

Lucas Santos Batista TELES¹, Tati de ALMEIDA¹, Rejane Ennes CICERELLI¹, Elder YOKOYAMA².

- (1) Programa de Especialização em Geoprocessamento Ambiental, Instituto de Geociências (IGD-UNB), Universidade de Brasília (UNB), Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, DF. Endereços eletrônicos: lsoteles@gmail.com; tati@unb.br.
- (2) Instituto de Geociências, Universidade de Brasília Campus Universitário Darcy Ribeiro. Instituto Central de Ciências – ICC. CEP 70.910-900 – Brasília DF. Caixa Postal 04465. CEP 70919-970. Endereço eletrônico; eyokoyama@unb.br; eloi@unb.br.

Introdução

Área de estudo

Metodologia

Resultados e discussões

Considerações Finais

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

RESUMO – A contínua e crescente necessidade das atividades humanas por insumos fosfatados, estimulam a criação e desenvolvimento de novos métodos e ferramentas de pesquisa que possam auxiliar na prospecção de novas áreas fontes deste minério. O presente trabalho tem por objetivo a utilização da técnica de Classificação Supervisionada Voltada ao Objeto para a localização de áreas com potencial ocorrência de rochas fosfatadas no município de Coromandel-MG, inseridas no contexto geológico da Formação Retiro, base do Grupo Vazante. Para se alcançar tal finalidade, foram usados dados relativos ao modelo digital de elevação (ALOS/PALSAR – 12.5m) e de gamaespectrometria como entradas principais e auxiliares, respectivamente. A classificação foi realizada por meio da ferramenta *Example Based Feature Extraction* do software *Envi 5.4* com o algoritmo classificador SVM que culminou na geração de duas classes principais, a unidade fosfatada e a unidade não fosfatada. O produto da classificação apresentou excelente correlação com os aspectos observados em campo, resultando em um coeficiente Kappa de 0.82 e índice de concordância perfeita.

PALAVRAS CHAVES: Classificação Supervisionada, fosfato sedimentar, Sensoriamento Remoto, Coromandel.

ABSTRACT –The continuous and growing need of human activities for phosphate inputs stimulates the creation and development of new methods and research tools that may help in the prospection of new ore sources. This work aims to use the Object-Based Supervised Classification technique to locate areas with potential occurrences of phosphate rocks in the county of Coromandel-MG, inserted in the geological context of the Retiro Formation, base of the Vazante Group. To achieve this purpose, were used data relative for the digital elevation model (ALOS/PALSAR – 12.5m) and gamma spectrometry as main and auxiliary inputs, respectively. The classification was performed using the *Example Based Feature Extraction* tool of the software *Envi 5.4* with the SVM classifier algorithm that resulted in the generation of two main classes, the phosphate unit and the non phosphate unit. The product of the classification showed excellent correlation with the aspects observed in the field, resulting in a Kappa coefficient of 0.82 and perfect agreement index.

KEYWORDS: Supervised Classification, sedimentary phosphate, Remote Sensing, Coromandel.

INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do consumo de insumos fosfatados para o uso agrícola na última década levou a necessidade de investigação de novos alvos prospectivos em áreas potenciais (Abram *et al.*, 2011; Abram *et al.*, 2016). O fosfato é muito utilizado no Brasil, país reconhecidamente agrícola, devido à sua importância econômica na indústria de fertilizantes. No entanto, o país ainda apresenta dependência externa desse insumo, pois apesar da crescente demanda da produção pela indústria de fertilizantes, observa-se que a extração de rochas fosfáticas não acompanha o crescimento, provocando uma valorização do minério fosfático (Fonseca & Silva, 2014).

Cerca de 80% das rochas fosfáticas no Brasil são de origem ígnea, associadas a complexos carbonatíticos, geralmente situados ao longo do azimute 125 (Souza,

2001). No entanto, o potencial de depósitos sedimentares, associados às bacias de margem passiva proterozoicas, carecem de estudos mais específicos para avaliar a real potencialidade dessas áreas dentro do cenário nacional de produção.

Dentre os depósitos fosfáticos já reconhecidos nas bacias sedimentares, destacam-se os inseridos na Faixa de Dobramentos Brasília, hospedados em rochas das Formações Sete Lagoas e Serra da Saudade do Grupo Bambuí e das Formações Retiro e Rocinha do Grupo Vazante. A ocorrência da Formação Retiro, base do Grupo Vazante, foi estudada primeiramente, e quase exclusivamente por Dardenne *et al.*, (2001) (figura 1) e tendo em vista a escassez de trabalhos geológicos sobre seu potencial mineral, foi selecionada como área de estudo desse artigo.

Coluna	Depósito Mineral	Descrição	Membro	Formação	Grupo	
	M	Ardósia rica em carbonato cinza Lentes de dolomito Ardósia carbonosa preta		Serra de Lagoa	V A Z A N T E	
	Pb-Zn - Morro Agudo	L	Bioerma estromatolítica, facies de brecha e dolarenito	Pamplona Superior		Morro do Calcário
	Zn - Vazante	K	Dolomito rosa com laminações algais, nodulos de barita e gretas de contração	Pamplona Médio		Serra do Poço Verde
		J	Ardósia cinza e verde com intercalações de dolomito rosa	Pamplona inferior		
		I	Dolomito cinza escuro com laminações algais e birds eyes	Morro do Pinheiro Superior		
		H	Dolomito cinza claro a rosa com intercalações de brecha e dolarenito	Morro do Pinheiro Inferior		
		G	Ardósia cinza			Serra do Garante
		F	Bioerma estromatolítica. Calcário cinza escuro Brecha dolomítica	Sumidouro		Lagamar
		E	Conglomerado	Arrepêndido		
		D	Ritmito			Rocinha
	Fosforito 3- Lagamar					
	Fosforito 2- Rocinha					
	C	Ardósia cinza escura pirítica e fosfática				
	B	Ritmito				
	Fosforito 1- Coromandel					
	Diamictito					
	A	Intercalações de quartzito, fosforito, diamictito e ardósia		Retiro		

Figura 1 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante, mostrando o depósito fosfático de Coromandel-MG, identificado como Fosforito 1 pertencente a Formação Retiro. Modificada de Dardenne et al 2001.

Youssef (1965) e Oliveira (1970) correlacionaram as ocorrências de fosfato às formas de relevo muito bem definidas (encostas arredondadas e topografia proeminente). A utilização de dados geofísicos de gamaespectrorradiometria (K, Th e U) apresentaram alguns resultados promissores conforme demonstrado por Kahn *et al.*(1998), Sousa & Ferreira (2005) e Fianco *et al.*(2014). Mais recentemente, o uso de espectrorradiometria de refletância, de imagens óticas multiespectrais e termais de sensoriamento remoto e de avançadas técnicas de processamento de imagens para prospecção regional de rochas fosfatadas, vêm sendo aplicada sistematicamente por diversos pesquisadores nessa última década (Vitarello *et al.*, (1993); De Souza & Pina

(2009), Da Cruz *et al.*,(2011); Teixeira (2012); Da Costa (2017)). No entanto, a pedogênese e a cobertura vegetal dificultam, em certo grau, a discriminação de rochas fosfatadas e a identificação de novos alvos utilizando essas tecnologias.

Nesse sentido, esse trabalho objetivou desenvolver uma aplicação metodológica visando detectar áreas de ocorrência de rochas fosfatadas no município de Coromandel - MG utilizando-se dados de modelo digital de elevação, gamaespectrorradiometria e processamento digital de imagens multiespectrais de alta resolução espacial com base na análise de atributos espaciais/espectrais de forma e textura (classificação supervisionada voltada ao objeto).

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo em questão localiza-se no município de Coromandel em Minas Gerais, a cerca de 430 km de Brasília, mais precisamente entre as coordenadas métricas UTM 284.653N a 295.011N e 7.963.329E a 7.984.435E (Datum horizontal WGS 84, zona 23S).

A partir da fotoanálise da densidade e forma da rede de drenagem, pode-se propor a segmentação da área em cinco zonas homólogas distintas (figura 2), descritas a seguir com base no método lógico de interpretação de fotos aéreas proposto por Soares e Fiori (1976): Zona homóloga 1 é caracterizada por uma baixa densidade de drenagem com sinuosidade mista, baixa angularidade, tropia predominantemente bidirecional e fraca assimetria. Zona homóloga 2 possui alta densidade de drenagem, sinuosidade retilínea com média angularidade, tropia bidirecional e fraca assimetria. Zona homóloga 3 apresenta

média densidade de drenagem com sinuosidade predominantemente curva, média angularidade, tropia multidirecional e fraca assimetria. Zona homóloga 4 apresenta uma alta densidade, sinuosidade mista, média angularidade, tropia multidirecional, assimetria fraca e meandros isolados na porção centro-sul como formas anômalas. Zona homóloga 5 ocorre com a menor densidade de drenagem da área, sinuosidade mista, média angularidade, tropia bidirecional e assimetria fraca.

A unidade fosfatada da Formação Retiro ocorre intrinsecamente associada à zona homóloga 3. Na parte central dessa zona ocorrem afloramentos de diamictitos polimíticos que gradam a arenitos conglomeráticos polimíticos e que estão em contato direto com siltitos fosfatados e fosforitos. A partir dessa observação, a metodologia foi focada a esse novo contexto geológico local.

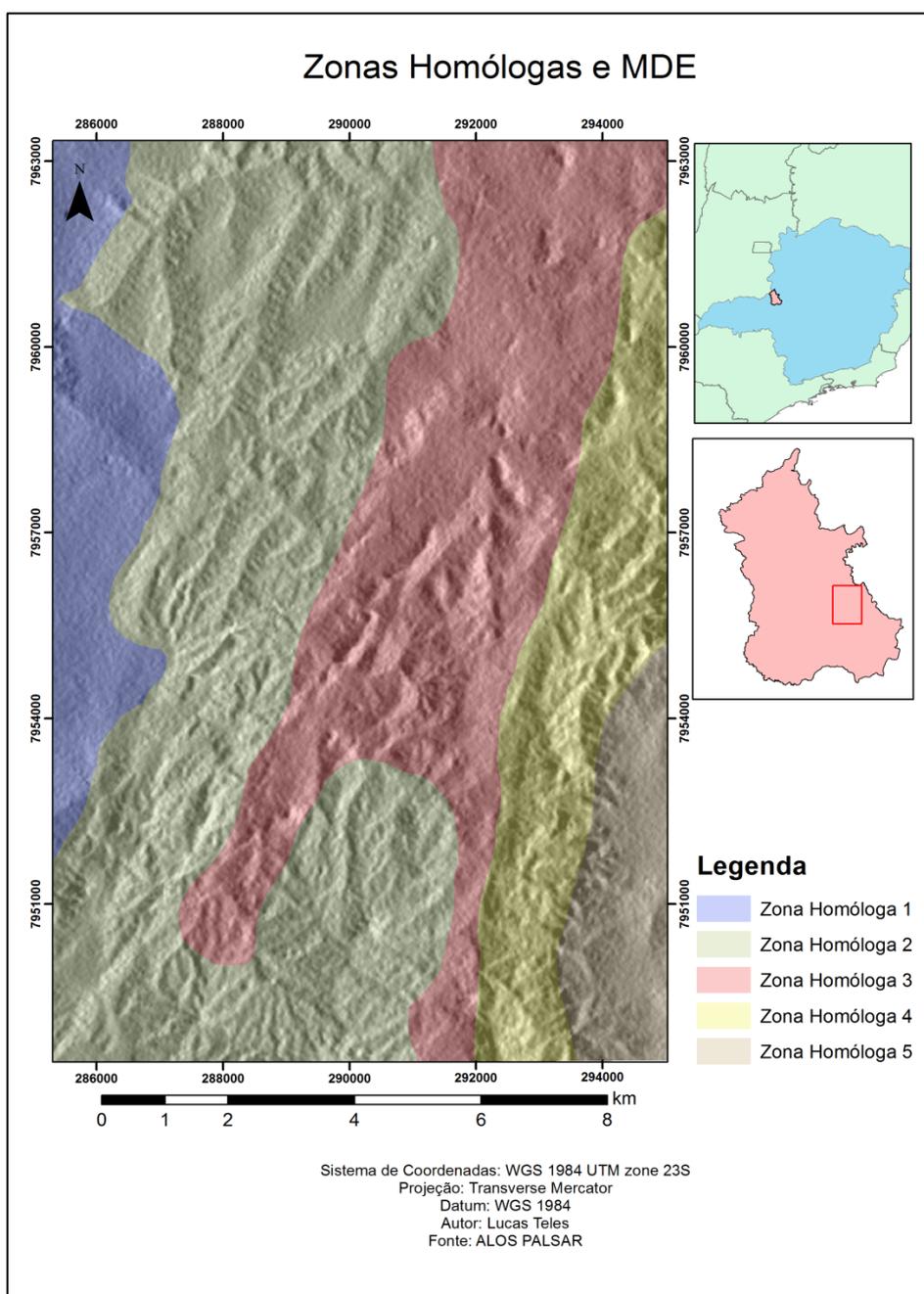


Figura 2 -- Mapa de densidade da rede de drenagem na escala de 1:70.000 mostrando as zonas homólogas de drenagem e o relevo sombreado gerado a partir da ferramenta *Hillshade* do software *Arcgis 10.2* com azimute 315° e altitude 15°. Importante notar a Zona Homóloga 3, na cor vermelha, local onde ocorre a unidade fosfatada.

METODOLOGIA

Para se alcançar o objetivo proposto, a metodologia foi subdividida em quatro etapas principais. A primeira consistiu na aquisição e processamento das imagens do modelo digital de elevação, a segunda no processamento e geração dos mapas

gamaespectrométricos, a terceira na classificação supervisionada da área e identificação das ocorrências de rochas fosfatadas e a quarta etapa consistiu na validação do resultado obtido por meio de comparação com a verdade terrestre.

Modelo Digital de Elevação

As características físicas da maior parte dos depósitos fosfáticos sedimentares brasileiros estão diretamente relacionadas com os aspectos geomorfológicos locais, mais especificamente topográficos. Geralmente as concentrações de rochas fosfatadas ocorrem na forma de morrotes com encostas suaves e topos arredondados que são o resultado da forte ação de processos intempéricos e erosivos.. Apesar de na área de estudo essa relação aparentar-se de forma mais sutil, a compartimentação topográfica construída pelo modelo digital de elevação, representa um importante dado de entrada no processo de classificação supervisionada.

O modelo digital de elevação foi obtido a partir da imagem do sensor PALSAR, adquirida gratuitamente no site da *Alaska Satellite Facility*.

O sensor Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) , lançado no início do ano de 2006, é um dos

três instrumentos a bordo do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS), que possui altura aproximada de órbita de 692 km e resolução temporal de 46 dias.

A área de trabalho encontra-se inserida na imagem PALSAR ALP268546810, adquirida na banda L, polarização HH, em 08/02/2011, com ângulo off-nadir de 34.3°, rotação Faraday de -1,00° (Tabela 1). Dentre as opções de *downloads* disponíveis para esta imagem, o pacote *Hires Terrain Corrected* atendeu satisfatoriamente os requisitos, com a vantagem de não necessitar de se fazer nenhum tipo de correção atmosférica na imagem e dispô-la ao usuário com a resolução espacial de 12,5 metros.

Após a aquisição do MDE, o processamento restringiu-se basicamente ao corte da imagem, com o auxílio do software *Envi 5.4*, limitando-a à área de ocorrência das rochas fosfatadas, na parte centro-sul da zona Homóloga 3.

Tabela 1— Metadados da imagem ALP268546810, do sensor ALOS/PALSAR.

Data de Aquisição: 02/08/2012
Modo de Feixe: FBS
Caminho: 58
Quadrante: 6810
Direção: Ascendente
Polarização: HH
Ângulo Off-Nadir: 34.3°
Rotação Faraday: -1.00°
Órbita Absoluta: 26854
Frequência: Banda - L

Gamaespectrometria

Uma característica marcante dos depósitos de fosfato de origem sedimentar é a fácil associação dos mesmos com elementos traços como selênio, molibdênio, zinco, cobre, cromo, elementos terras raras e em especial o urânio. Os valores médios da concentração de U em fosforitos variam de 50 a 200 ppm sendo que nas fácies mais ricas

em matéria orgânica, esses valores podem atingir 3000 ppm (Jarvis *et al.*,1994).

Em consequência dessa associação, os levantamentos de gamaespectrometria tornam-se uma das formas mais eficientes de se localizar a ocorrência de depósitos dessa natureza. No caso do trabalho em específico, a região de pesquisa encontra-se inclusa no

polígono da área 01 do Programa 2001 da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) e após a etapa de processamentos necessários a estes dados, os produtos foram utilizados como dados auxiliares na classificação.

O levantamento de aquisição dos dados de gamaespectrometria da área 01 foi contratado pela CODEMIG e realizado pela empresa Lasa Engenharia e Prospecção S.A, no ano de 2001 e resultou numa cobertura total de 20.000 km² de área mapeada.

Para o recobrimento aerogeofísico, a área 01 foi compartimentada em dois blocos: Bloco norte e bloco sul, sendo esse último o bloco local onde se insere a área de estudo. As linhas de produção no bloco sul foram voadas na direção N30W com espaçamento de 250 metros, enquanto as linhas de controle tiveram direção N60E e espaçamento de 2500 metros com altitude de voo de 100 metros e velocidade média de 200 km/h.

As contagens dos elementos radiométricos ocorreram a cada segundo e foram adquiridas por meio do aerogamaespectrômetro Picodas, modelo PGAM com 256 canais espectrais, onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado de forma individual para melhor identificação dos fotopicos relativos ao urânio, potássio e tório (Lasa Engenharia e prospecção S.A., 2001).

O processamento dos dados de geofísica foi uma importante etapa de trabalho e contou com a utilização do software *Arcgis 10.2* para a confecção dos mapas quantitativos relativos aos elementos radiométricos. Primeiramente, o banco de dados adquiridos no levantamento foi aberto no software *Geosoft Standart Edition 4.2* e

exportado como dado vetorial, passível de ser manipulado pelo *Arcgis 10.2*.

Após essa primeira etapa, o dado vetorial foi recortado para a área de interesse e teve seu sistema de coordenadas alterado de Córrego Alegre UTM Zona 23S para WGS 1984 UTM Zona 23S, com o objetivo de adequação aos outros planos de informação da base de dados. Com o dado vetorial devidamente organizado, foram aplicadas ferramentas de interpolação para a geração dos mapas quantitativos.

As leituras do gamaespectrômetro foram realizadas a cada segundo, o que resultou em um grande volume de amostragem propiciando a utilização do interpolador *Natural Neighbor*, método de interpolação determinista que gera uma superfície a partir dos valores dos vizinhos mais próximos.

A partir dessa interpolação, foram gerados três mapas temáticos: Um relativo à distribuição da concentração de K em porcentagem, um segundo da distribuição da concentração de Th em ppm e o último com a distribuição da concentração de U também em ppm.

A parametrização utilizada consistiu basicamente na indicação das colunas da tabela do dado vetorial que continham as informações sobre a concentração de cada elemento (KPERC, UPPM e THPPM) no campo *Z valeu field*, seguida da definição do tamanho de célula igual a 40 metros.

Por fim, os rasters gerados foram transformados em imagens tiff com resolução de 32 bits e empilhados no *Envi 5.4* com a ferramenta *Layer Stacking*, em células de 40 metros, resultando na composição colorida RGB da figura 3.

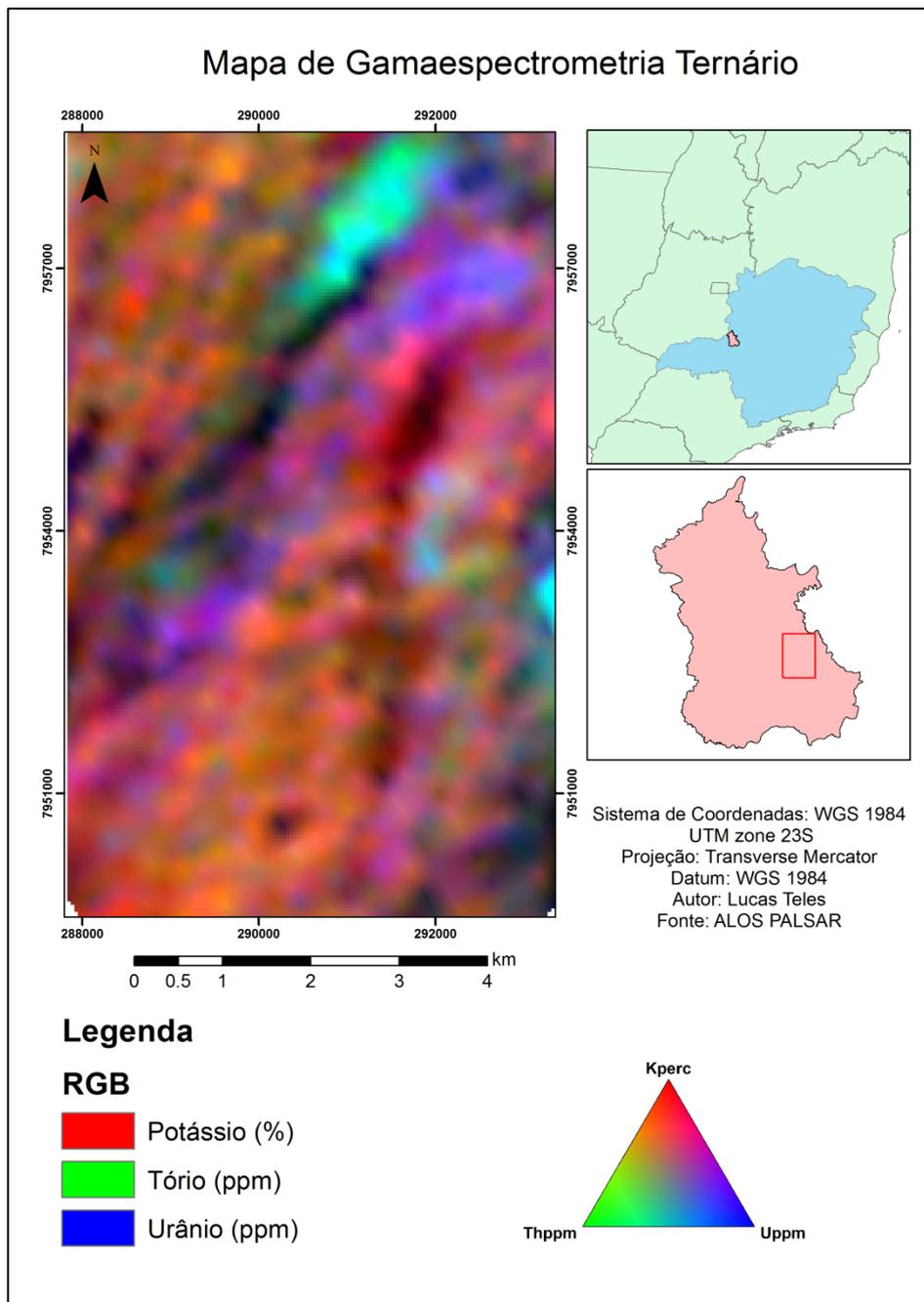


Figura 3 - Mapa ternário de gamaespectrometria na escala de 1:50.000, produto final do processamento da geofísica.

Classificação Supervisionada

A técnica de Classificação Supervisionada consiste em um método estatístico que possibilita a definição de padrões e objetos homogêneos em imagens, a partir da seleção de amostras de treinamento.

A classificação foi realizada pela ferramenta *Example-based Feature Extraction* do software *Envi 5.4*, onde o modelo digital de elevação assumiu a função de dado de entrada principal e as bandas relativas ao tório e urânio,

de dados auxiliares. Para a criação das amostras de treinamento, a imagem foi segmentada com o algoritmo *Edge*, com nível de escala igual a 10, configuração de fusão, que agrega os elementos menores aos maiores, com o algoritmo Full Lambda Schedule (FLS) com o valor igual a 10 e tamanho Kernel de 3.

Após a segmentação, na etapa de seleção dos atributos, os parâmetros utilizados foram os de default do software, sendo que

dessa maneira, todos os aspectos texturais, espectrais e espaciais das regiões de treinamento foram considerados na classificação.

Por fim, foi selecionado o algoritmo de classificação *Support Vector Machine* (SVM) que apresenta uma maior robustez de processamento. Esse algoritmo é baseado na solução de um problema quadrático dependente dos vetores de treinamento escolhidos e dos parâmetros selecionados (Vapnik, 1995). Subsequente à etapa de parametrização descrita

anteriormente foram selecionadas as amostras de treinamento em duas classes distintas: A unidade fosfatada e a unidade não fosfatada. Para a unidade fosfatada foi selecionado um total de 267 amostras, que foram escolhidas com base nas regiões que apresentavam as mais altas concentrações de U e Th e topografias mais elevadas. Por outro lado, a unidade não fosfatada contou com a escolha de 372 amostras, que representavam os locais com as concentrações mais baixas desses elementos.

Validação do resultado

A validação do resultado foi a última etapa da metodologia e consistiu na comparação do produto da classificação supervisionada com

a verdade terrestre. A verdade terrestre foi definida a partir de 39 pontos de campo, distribuídos pela área conforme a figura 4.

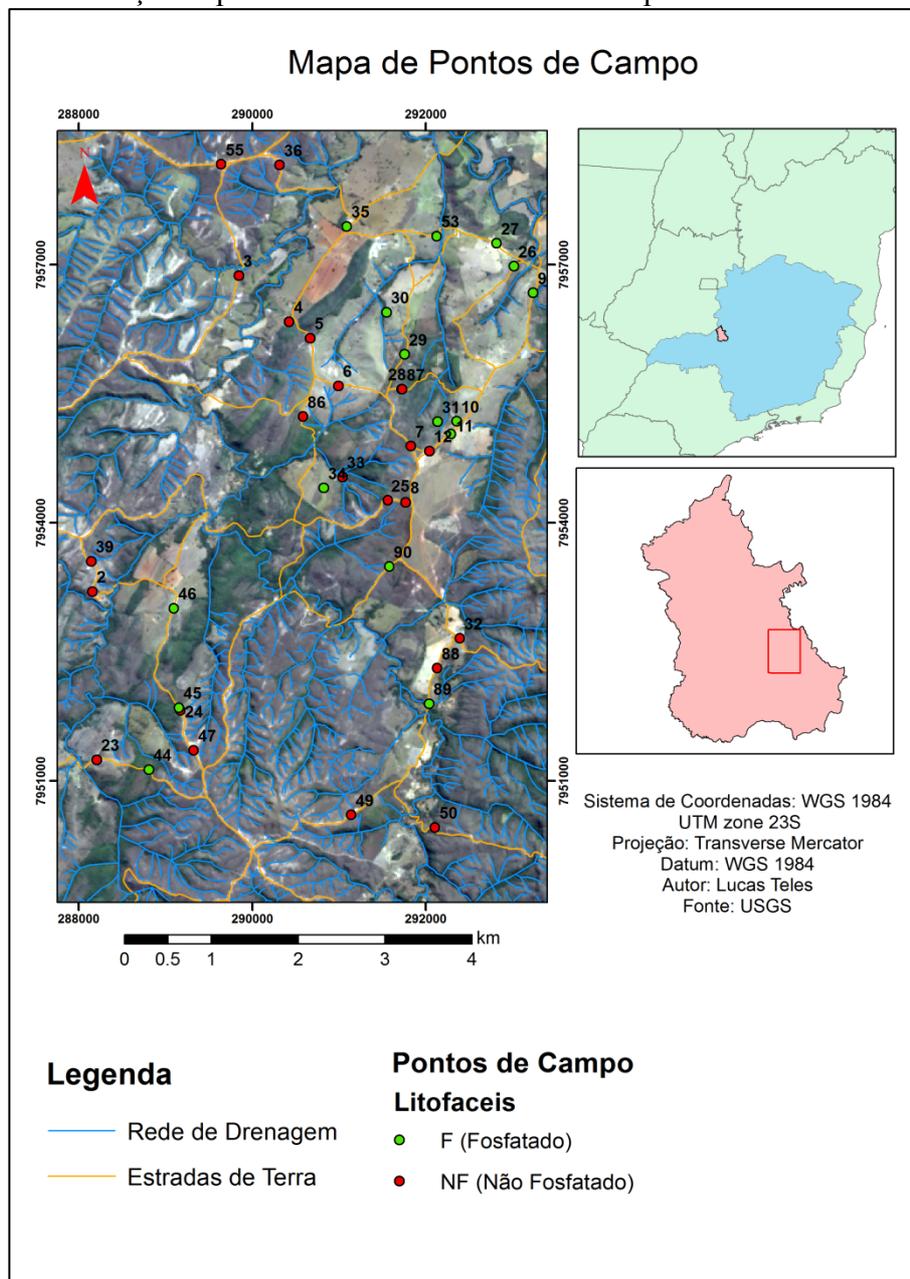


Figura 4 - Mapa de pontos de campo na escala de 1:50.000. Os pontos que possuem a presença de rochas fosfatadas estão indicados em verde, enquanto os pontos de rocha não fosfatada estão indicados em vermelho.

Dos 39 pontos de campo, foram descritos 16 afloramentos de fosforitos e siltitos fosfatados (F) e 23 afloramentos de diamictitos e pelitos não fosfatados (NF) (apêndice 1). As rochas fosfatadas foram identificadas em campo a partir das suas características mineralógicas, estruturais e texturais além da utilização de molibdato de amônia, tento em vista que o fosfato reage com essa substância em meios acidificados formando um produto de cor amarela cuja intensidade da cor está diretamente ligada a concentração de PO_4 .

Dos 16 afloramentos de rocha fosfatada observados, foram realizadas 11 amostragens (LTC – 09B, 11B, 11C, 26, 30, 46, 53, 89A, 90A, 90B e 90C), analisadas por meio da difração de raio-X para a confirmação da existência de minerais de fosfato.

Para a geração dos difratogramas de fração argila e rocha total, aplicou-se a rotina de análises do Laboratório de Raio-X da Universidade de Brasília que conta com um difratômetro Rigaku - Ultima IV.

Para a fração argila, as 11 amostras selecionadas foram pulverizadas manualmente em panela de ágata e separados cerca de 7

gramas por amostra, que foram diluídas em 150 mL de água destilada e centrifugadas a 750 RPM por 7 minutos. Após essa primeira fase, o sobrenadante foi reservado em um tubo limpo e novamente centrifugado a 3000 RPM por 30 minutos, resultando na decantação de todo material argiloso, utilizado para a confecção das lamina de fração argila, glicolada e aquecida. No caso da análise de rocha total, a amostra pulverizada foi diretamente inserida no sulco da lâmina específica para tal procedimento.

A composição mineralógica das amostras pôde ser compilada em três grupos representativos: O grupo na qual as amostras são basicamente compostas por quartzo, clinocloro, rutilo, anatásio, muscovita e fluorapatita como mostra o difratograma da amostra LTC 09B (figura 5). O grupo da amostra LTC 30 composto por fluorapatita, quartzo, caulinita, illita, wavelita e rutilo (figura 6) e o grupo de composição mineralógica formada por quartzo, muscovita, fluorapatita, ferroactinolita e caulinita, como mostrado no difratograma da amostra LTC90A (figura 7).

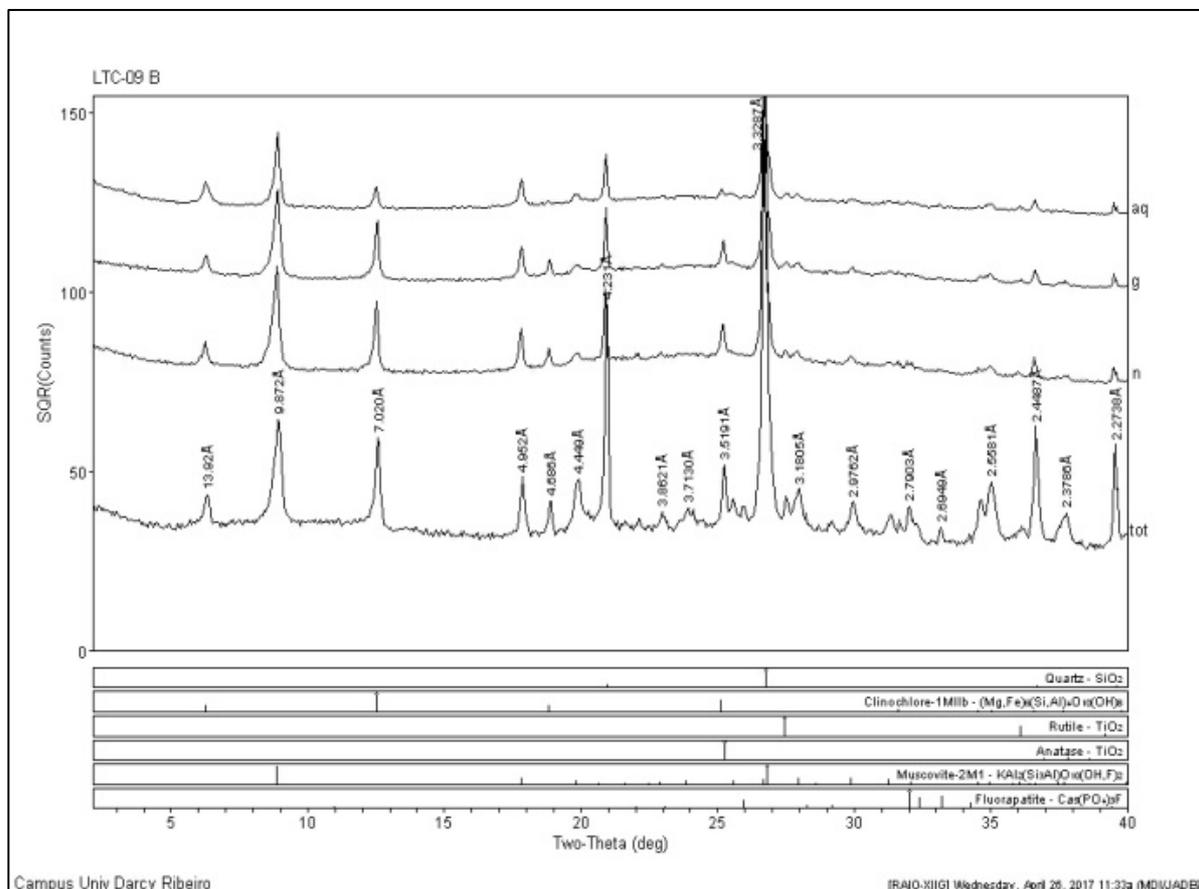


Figura 5 - Difratograma da amostra LTC 09B, que apresenta mineralogia semelhante às amostras LTC 11B e 11C.

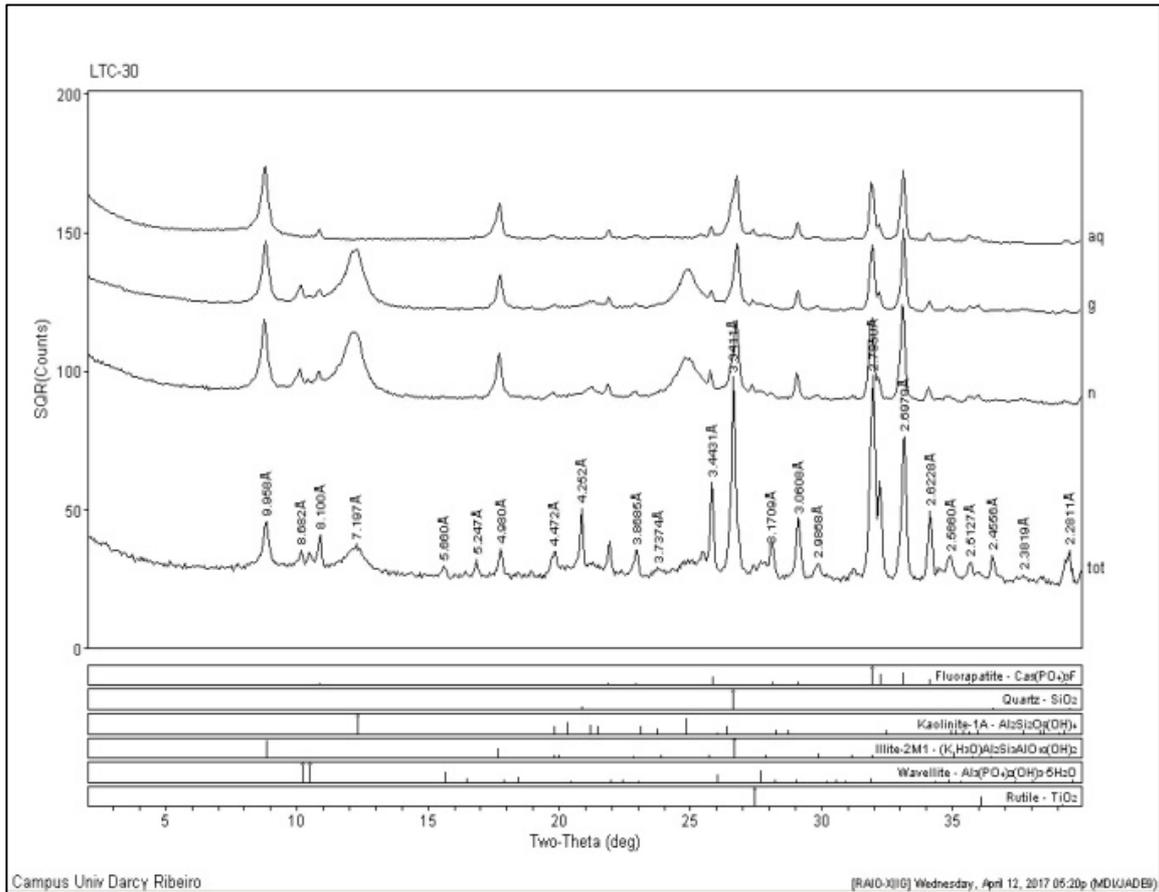


Figura 6 - Difratoograma da amostra LTC 30, que apresenta composição mineralógica semelhante à amostra LTC 26.

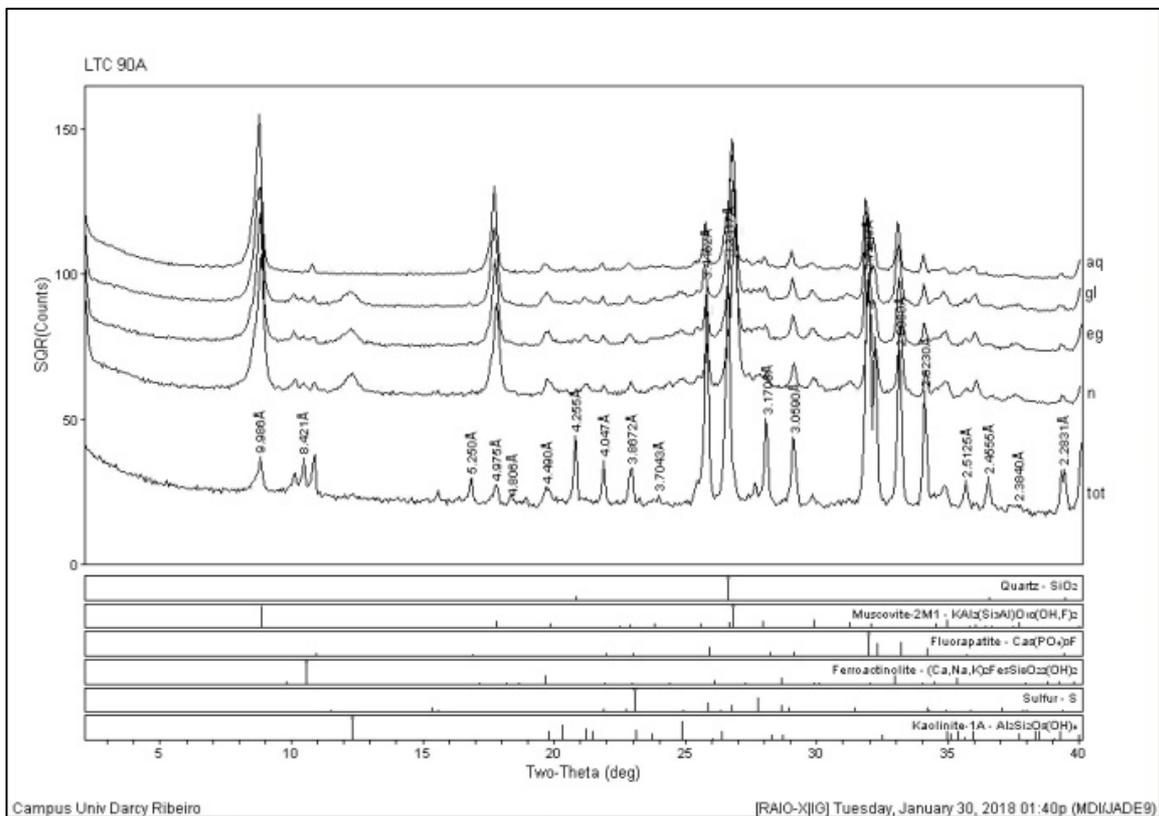


Figura 7 - Difratoograma da amostra LTC 90A, que apresenta composição mineralógica semelhante às amostras LTC 46, 53, 89, 90B e 90C.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado obtido após os processamentos e etapas descritas na metodologia foi alcançado de forma bem sucedida. As ocorrências de rocha fosfatada na região de Coromandel-MG foram bem discriminadas pela Classificação Supervisionada, como mostra a figura 8, e apresentaram uma boa correlação com os dados observados em campo.

O produto final obtido pela classificação mostra que a ocorrência da unidade fosfatada na

área exibe-se na forma de zonas descontínuas, de limites bem demarcados e direção NE-SW que circundam um núcleo de diamictitos e arenitos conglomeráticos. Além da geometria, a classificação mostra que os depósitos estão restringidos à porção central da área, sem a presença de ocorrências nas adjacências, mostrando que essa acumulação de fosfato está fortemente relacionada à um modelo metalogenético específico.

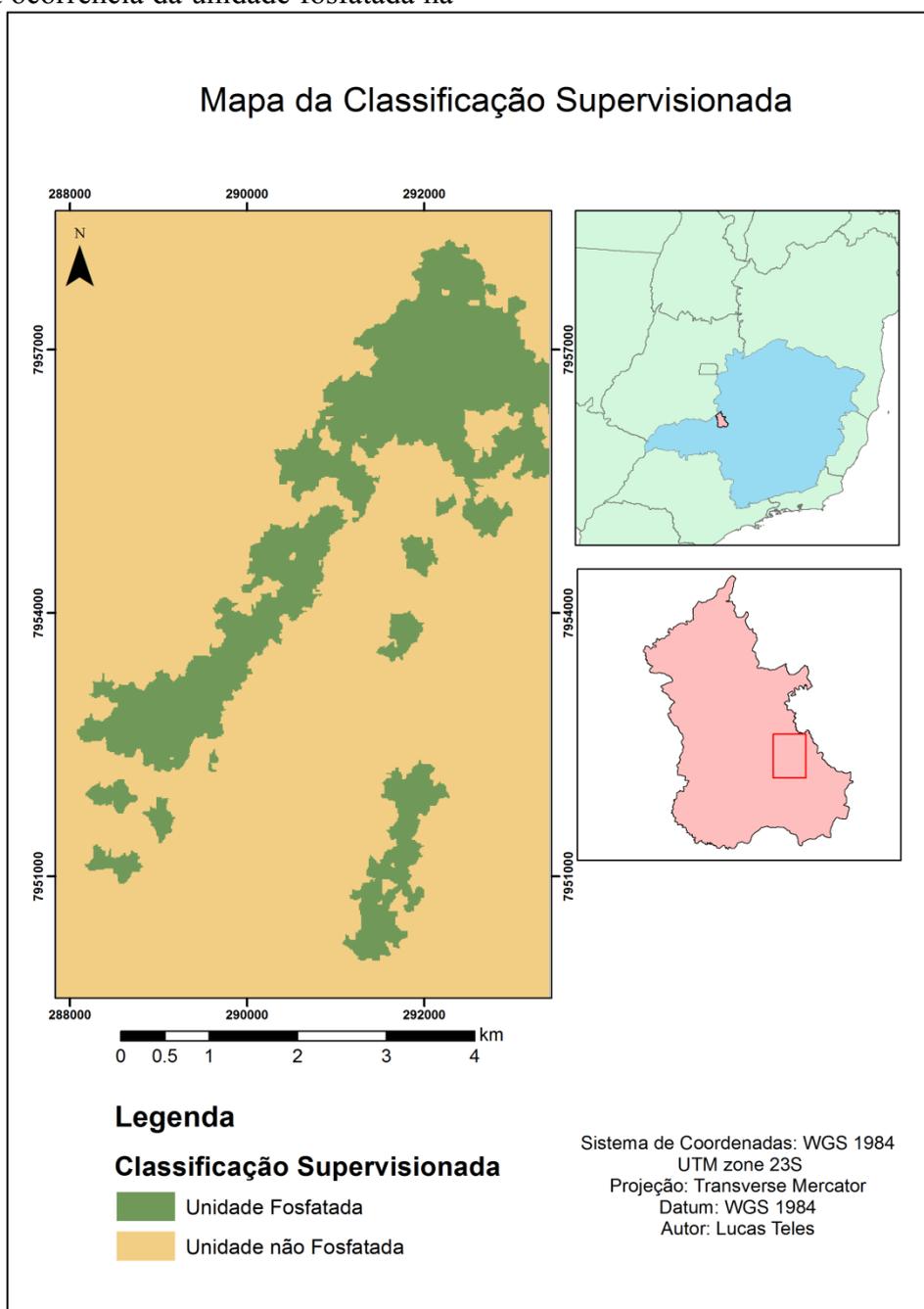


Figura 8 - Mapa na escala de 1:50.000 mostrando o resultado da Classificação Supervisionada. A unidade fosfatada encontra-se demarcada na cor verde, enquanto a unidade não fosfatada aparece na cor amarela.

Para demonstrar a correlação entre o produto da classificação e a verdade terrestre (figura 9), os pontos observados em campo

foram avaliados por meio do coeficiente Kappa e classificados segundo a tabela de Landis e Koch, 1977 (tabela 2).

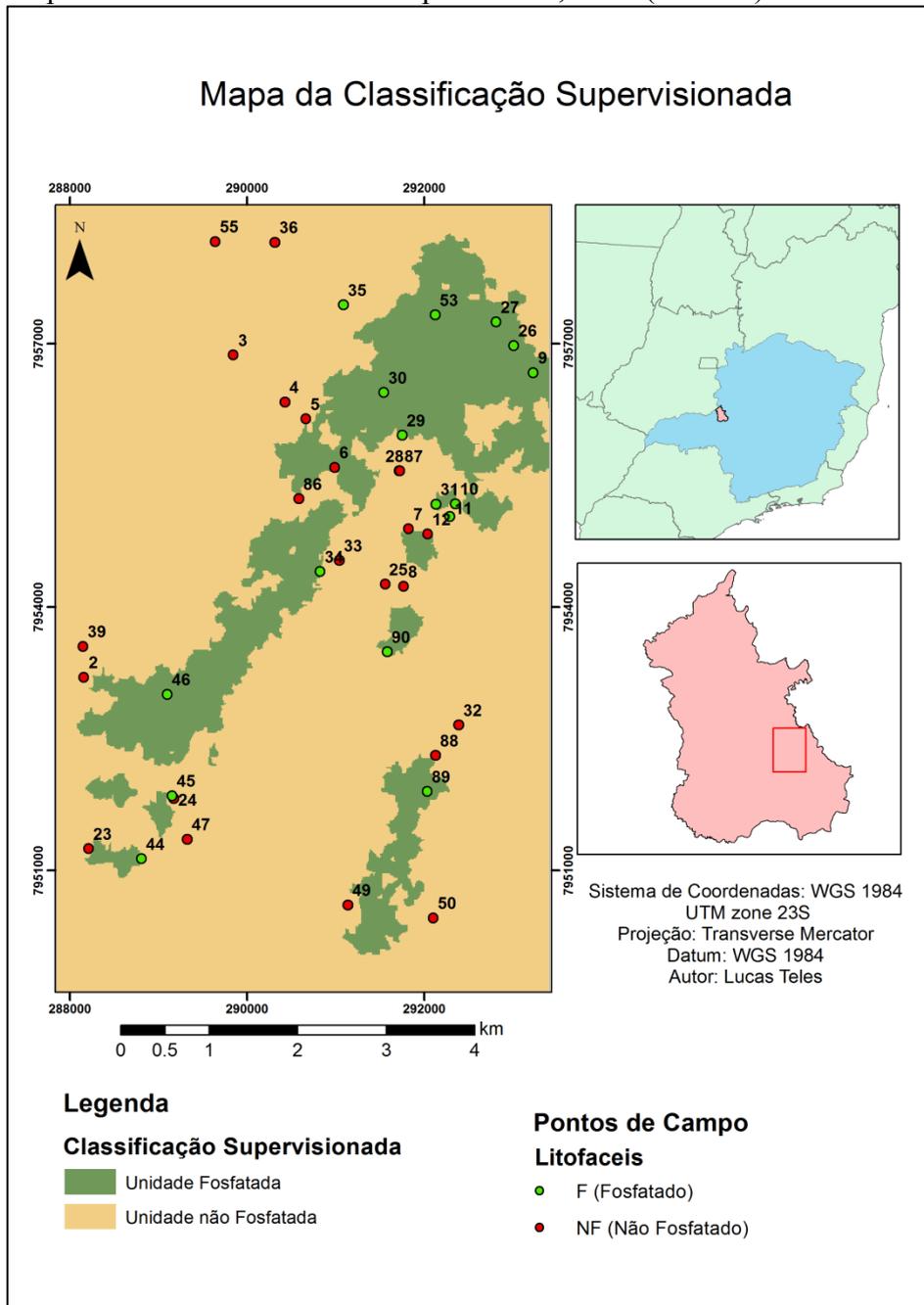


Figura 9 - Mapa na escala de 1:50.000 mostrando a relação existente entre as unidades geradas na classificação supervisionada e os pontos de campo.

Tabela 2- Tabela de coeficiente Kappa retirada de Landis e Koch, 1977.

Coeficiente Kappa	Nível Concordância
Menor que 0	Inexistente
Entre 0 e 0.20	Mínima
Entre 0.21 e 0.40	Razoável
Entre 0.41 e 0.60	Moderada
Entre 0.61 e 0.80	Substancial
Entre 0.81 e 1.00	Perfeita

Dos 39 pontos de campo observados, 32 se encaixaram nas suas respectivas classes classificadas, resultando em um coeficiente Kappa com valor igual a 0.82 e concordância perfeita. Os pontos relativos à unidade não fosfatada que caíram dentro da classe fosfatada, e que compreendem a maior parte dos 7 pontos destoantes, marcam as interfaces de contato entre as duas classes, mostrando novamente a robustez da classificação obtida.

Por fim, quando comparados os tipos de Classificações Supervisionadas e seus respectivos classificadores disponíveis no software utilizado (PCA, KNN, SVM), observa-se que entre eles existem grandes diferenças em suas aplicações. O algoritmo *Principal Components Analysis* (PCA) que se baseia na comparação entre cada segmento da imagem com as amostras de treinamento

escolhidas na direção de principal componente da imagem e os agrupa em classes com valores semelhantes, torna-se um classificador limitado para um local que apresenta ampla heterogeneidade de feições, como é o caso da área estudada. Por outro lado, o classificador *K Nearest Neighbor* (KNN), método que classifica cada segmento em relação à sua distância Euclideana das amostras de treinamento, apresenta uma boa eficiência na separação entre elementos de classes similares, no entanto, mesmo sendo um classificador robusto, não foi aplicável a situação de Coromandel, tendo em vista a grande segmentação da área de estudo, sendo assim, o algoritmo de melhor rendimento e que resultou no produto de maior confiabilidade foi o SVM.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do objetivo proposto e do resultado obtido pode-se fazer algumas inferências acerca da utilização da técnica de Classificação Supervisionada SVM aplicada à descoberta de alvos exploratórios:

- A Classificação Supervisionada é uma técnica bastante difundida em trabalhos relativos ao monitoramento ambiental, mas que também pode ser uma poderosa ferramenta de auxílio à geologia de exploração.
 - O modelo digital de elevação quando aliado aos dados quantitativos de geofísica aérea podem ser facilmente manipulados por técnicas de Sensoriamento Remoto e carregam informações preciosas sobre a localização de ocorrências minerais.
 - No caso do depósito de fosfato de Coromandel (MG), a associação
- entre as rochas fosfatadas e a compartimentação geomorfológica da área não ocorre de forma clara, e por isso os dados de geofísica aérea foram essenciais para o sucesso do classificador.
 - O algoritmo de classificação SVM foi o de melhor rendimento, mesmo demandando maior tempo e capacidade de processamento, além de necessitar de uma maior quantidade de amostras de treinamento.
 - A correlação obtida entre a verdade terrestre e o modelo da Classificação Supervisionada apresentou um nível de concordância perfeita, o que indica a eficiência do método escolhido para o depósito de Coromandel-MG.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores e funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília que auxiliaram na confecção do presente trabalho, em especial aos orientadores, aos técnicos dos laboratórios utilizados para aquisição de dados e colegas participantes do VI Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental - UnB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abram, M. B., Bahiense, I. C., Porto, C. G., & Brito, R. S. (2011). **Projeto Fosfato Brasil-parte I**. CPRM. Relatório

Abram, M. B.; Cunha, I. A.; Almeida, R. C. (2016) **Projeto Fosfato Brasil-parte II**. CPRM. Relatório

Da Costa¹, M. A. C. (2017) **Espectroscopia de reflectância de rochas da Suíte Alcalina Juquiá, sudeste do Estado de São Paulo**.

Da Cruz, J. R., de Souza Filho, C. R., Abram, M. B., & Marcon, R. (2011) **Caracterização espectral do depósito de fosfato de Araxá (MG)**.

Dardenne, M. A. (2001) "**Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group.**" *IGCP*. Vol. 450.

De Souza, N. P. (2009). **Espectrorradiometria em depósito de fosfato magmatogênico: Aplicação para o depósito de Catalão I - GO**.

Fianco, C. B., Vidotti, R. M., & Pires, A. C. B. (2014). **Phosphorite Prospection using ground gamma spectrometry in northeast Goiás state, Brazil**. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32(4), 721-733.

Fonseca, D. S., & Silva, T. (2014). **Sumário mineral brasileiro: fosfato**. Brasília: DNPM.

Jarvis, I., Burnett, W.C., Nathan, Y., Almbaydin, F.S.M., Attia, A.K.M., Castro, L.N., Flicoteaux, R., Hilmy, M.E., Husain, V., Qutawnah, A.A., Serjani, A., and Zanin, Y.N., (1994), **Phosphorite geochemistry—state-of-the-art and environmental concerns: Eclogae Geologicae Helveticae**, v. 87, p. 643–700.

Khan, K., Khan, H. M., Tufail, M., Khatibeh, A. J. A. H., & Ahmad, N. (1998). **Radiometric analysis of Hazara phosphate rock and fertilizers in Pakistan**. *Journal of Environmental Radioactivity*, 38(1), 77-84.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). **An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers**. *Biometrics*, 363-374.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. (2001). **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos**. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 01. Projeto Unaí-Vazante-Paracatu-Coromandel. Volume I, Texto técnico.

Meneses, P. R., & Almeida, T. D. (2012). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq.

Oliveira, F. A. D. (1970). **Fosfato do Tennessee**: [relatório de viagem aos Estados Unidos].

Soares, P. C., & Fiori, A. P. (1976). **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia**. *Notícia Geomorfológica*, 16(32), 71-104.

Souza, J. L. D., & Ferreira, F. J. F. (2005). **Anomalias aerogamaespectrométricas (K, eU e eTh) da quadrícula de Araras (SP) e suas relações com processos pedogenéticos e fertilizantes fosfatos**. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3), 251-274

Sousa A.E. 2001. Balanço Mineral Brasileiro de Fosfato. Brasília, DNPM/MME, p1-3.

Teixeira, R. D. A. (2012). **Avaliação espectral de depósitos de fosfatos utilizando imagens ASTER das regiões de Campos Belos e Catalão (GO)**. Dissertação de mestrado

Vapnik, V.N (1995). **The Nature of Statistical Learning Theory**. Springer.

©JAXA/METI ALOS PALSAR ALP268546810 (2012). Accessed through ASF DAAC, <<https://www.asf.alaska.edu>> 20/05/2017.

Vitorello, I., Galvão, L. S., & Paradella, W. R. (1993, November). **Diferenciação Espectrorradiométrica de Lateritas Mineralizadas do Complexo de Maicuru (PA)**. In *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.

Youssef, M. A, (1965). **Genesis of bedded phosphates**. *Economic geology*, 60(3), 590-600.

APÊNDICE 1

Ponto	Coord. X	Coord. Y	Altitude	Descrição Litológica	Amostra
2	288157	7953201		838 Diamítico polimítico (granitos, pelitos, quartzitos) milonitizado em algumas porções	LTC-02
3	289845	7956873		784 Pelito avermelhado sem a presença de minerais micáceos	
4	290426	7950337		795 Pelito avermelhado sem a presença de minerais micáceos	
5	290664	7956145		829 Litoarenito feldspático ao lado de morro de carbonato substituído por silixito	
6	290991	7955592		858 Pelito roxo intercalado por finas camadas arenosas estranquiquadas	
7	291826	7954892		888 Conglomerado arenoso matriz suportado e polimítico (quartzito, pelito)	
8	291768	7954237		917 Siltito avermelhado laminado intercalado por pelitos	
9	293236	7956672		811 Blocos de siltito escuro laminado e venulado reagente a molibdato de amônia	LTC-09 A, B
10	293355	7955179		856 Siltito avermelhado laminado, possível siltito fosfatado alterado	
11	292290	7955034		870 Siltito avermelhado laminado, possível siltito fosfatado alterado	LTC-11 A, B
12	292042	7954834		890 Conglomerado arenoso matriz suportado e polimítico (quartzito, veio de quartzo, siltito, granitos)	
23	288209	7951247		852 Pelito avermelhado intercalados com arenitos arcoseanos médios	LTC-23
24	289171	7951821		877 Pelito rosado laminado e com foliação penetrativa, sem reação com molibdato	
25	291562	7954262		897 Arenito conglomerático polimítico (quartzito, tonalito, pelito) diminui-se a presença de clastos	LTC-25A, B, C
26	293013	7956982		816 Rocha fosfatada alterada bandada com reação moderada ao molibdato	LTC-26
27	292815	7957249		830 Pelito avermelhado encontrado logo após o fosfato	
28	291719	7955553		874 Arenito conglomerático polimítico (quartzito, tonalito, pelito) com matriz areia fina	
29	291752	7955958		890 Siltito avermelhado laminado, provavelmente unidade fosfatada.	
30	291545	7956446		841 Blocos alterados de rocha fosfatada bandada (foslu e fosfa) com reação ao molibdato	LTC-30
31	292133	7955174		850 Pelito rosado laminado e com foliação penetrativa, sem reação com molibdato	
32	292393	7952658		867 Clorita fito pouco alterado com boudins de quartzo	
33	291040	7954532		808 Camadas de gravauaras intercaladas por siltitos avermelhados	
34	290824	7954405		872 Siltito bandado com bandas claras e escuras, possivelmente fosfatado	
35	291088	7957445		808 Ardósia roxa laminada e de foliação penetrativa (Ocorrência de fosfato pela CPRM)	
36	290313	7958157		822 Intercalação entre camadas milimétricas de pelito e camadas centimétricas de arenito fino	
39	288145	7955353		868 Arenito conglomerático matriz suportado polimítico (quartzito e pelitos) com locais de característica grauvaquina	
44	288807	7951133		899 Provável fosforito laminado sem reação	
45	289156	7951882		878 Provável fosforito laminado sem reação e de coloração esverdeada (mais fresca)	
46	289098	7953006		844 Conglomerado polimítico e matriz suportado com variados tamanhos de clastos, com metros abaixo ocorre o contato com rocha pelítica laminada e amarelada que forma blocos parcialmente silicificados com reação ao molibdato de amônia	LTC-46
47	289323	7951357		901 Pelitos avermelhados intensamente laminados	
49	291139	7950606		879 Diamítico polimítico onde observam-se clastos de granito grosso estranquizado e tonalito escuro fino, cerca de cem metros abaixo ocorre uma faixa de pelitos amarelados com blocos silicificados e oxidados de possível fosforito.	
50	292105	7950459		862 Chl-fengita fito do Grupo Canastra, ocorre a presença de espesso lássolo vermelho onde é descrito um calcário da Fm. Sete Lagoas, porém não foram encontrados blocos.	
53	292124	7957331		789 Fosforito laminado com reação ao molibdato de amônia	LTC-53
55	289641	7958166		850 Rocha pelítica foliada de coloração avermelhada menos tectonizada do que a anterior	
86	290585	7955235		848 Pelito avermelhado estratificado intercalados por siltitos amarelados	
87	291728	7955552		868 Conglomerado de matriz arenosa que grada a diamítico com matriz pelítica e por fim ocorre a intercalação entre pelitos e arenitos finos	
88	292128	7953310		842 Tectonito na base do empurrão brechado de direção NE, com seixos e veios de quartzo estratificados (Superfície de descolamento do Canastra) - perto do Calcário CPRM	
89	292037	7951899		823 Siltito escuro venulado na cara de artilho garimpo de diamante com reação ao molibdato de amônia e logo acima calcário micrítico escuro com foliação em alto ângulo	LTC - 89 A, B
90	291582	7953491		892 Laterita fosfatada com reação ao molibdato de amônia localizada diretamente acima do diamítico.	LTC - 90A, B, C