

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

MOISÉS DE OLIVEIRA SENHORINHO

IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS NA  
REGIÃO DE LAVRAS DO SUL (RS) COM O USO DO SENSORIAMENTO  
REMOTO

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para  
obtenção do Título de Mestre em Geociências.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

BANCA EXAMINADORA: Prof. Dr. Breno Leitão Waichel  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha  
Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

Porto Alegre, 2012

Senhorinho, Moisés de Oliveira

Identificação de padrões de alterações hidrotermais na região de Lavras do Sul, RS com o uso do sensoriamento remoto. / Moisés de Oliveira Senhorinho. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2012.

[105 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2012.

Orientação: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

1. Alteração Hidrotermal. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Escudo Sul-Rio-Grandense. 4. Lavras do Sul, RS. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Arthur e Eva, e aos meus irmãos, Cecília, Josué, Eliseu, Benjamin, Miriam e Isabel, e também aos meus sobrinhos pelo suporte e incentivo que sempre me deram.

Ao PPGGeo/UFRGS pela gratuidade do ensino e pela infra-estrutura de qualidade disponibilizada. Ao Prof. Evandro Fernandes de Lima pela orientação e pelo apoio dado para a conclusão deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado obtida no período inicial de nosso trabalho e pelo apoio financeiro vinculado ao projeto Universal 470505/2010-9 "Petrogênese, organização estratigráfica e origem das mineralizações de metais básicos e ouro da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul/RS".

## SUMÁRIO

RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
Lista de abreviaturas.....	8
Lista de figuras.....	9
Lista de tabelas.....	11
1 INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Localização da área.....	17
1.2 Contexto geológico e caracterização do problema .....	19
1.3 Objetivos .....	25
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
2.1 Revisão bibliográfica.....	27
2.2 Sensoriamento Remoto .....	27
2.2.1 Pré-processamento .....	31
2.2.2 Geração de composições coloridas .....	32
2.2.3 Classificação .....	33
2.2.4 Operações aritméticas.....	34
2.2.5 Filtragem espectral.....	34
2.2.6 Componentes principais .....	35
2.3 Compilação de dados em plataforma SIG .....	36
2.4 Fotointerpretação estrutural .....	37
2.5 Trabalho de campo .....	38
2.6 Espectrorradiometria.....	39
2.7 Petrografia e MEV.....	40
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	41
3.1 Sensoriamento Remoto .....	41
3.2 Trabalho de campo .....	53
3.2.1 Bloco do Butiá .....	54
3.2.2 HL-01, 02, 03 e 07.....	55
3.2.3 HL-08.....	56

3.2.4	HL-15.....	57
3.2.5	HL-17, 45 e 48.....	57
3.2.6	HL-18.....	59
3.2.7	HL-19 e 20.....	61
3.2.8	HL-23.....	62
3.2.9	HL-24 e 25.....	63
3.2.10	HL-26 e PBE-01 .....	64
3.2.11	HL-40.....	66
3.2.12	HL-41.....	67
3.2.13	HL-42.....	68
3.2.14	HL-43.....	69
3.2.15	HL-46.....	69
3.2.16	PBE-04.....	69
3.3	Petrografia .....	70
3.3.1	Lavas andesíticas .....	70
3.3.2	Monzonitos.....	74
3.3.3	Lamprófiro espessartítico .....	79
3.3.4	Tufos andesíticos .....	81
3.3.5	Brechas Vulcânicas - Ignimbritos .....	82
3.3.6	Biotita Monzogranito.....	83
3.3.7	Monzogranito leucocrático.....	84
3.3.8	Caracterização do Hidrotermalismo na região de Lavras do Sul .....	84
3.4	Espectrorradiometria.....	87
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

## RESUMO

A região de Lavras do Sul (RS) possui mineralizações de metais básicos e de ouro, disseminadas e filoneanas, associadas a zonas de alteração hidrotermal. O trabalho realizado tem por objetivo a identificação, nesta região, de áreas com alterações hidrotermais com o apoio de técnicas de sensoriamento remoto. Na cena 222/81 do sensor TM/Landsat-5 de 15/01/1986, ano de muito baixa pluviosidade, foram identificadas feições espectrais destacadas em uma antiga mina aurífera da região, o Bloco do Butiá, localizada 3 km à oeste da cidade de Lavras do Sul. Esta área foi selecionada como área piloto e utilizada como guia na interpretação das imagens por ter as zonas de alteração, paragênese e estruturas já descritas na bibliografia. As imagens foram geradas a partir do conjunto das seis bandas espectrais por meio de processamento e análise digital e analógica. Uma cena ASTER deste local também foi utilizada, para identificar alterações hidrotermais. As subcenas destas imagens foram redimensionadas de forma a compreender o Complexo Intrusivo Lavras do Sul e as principais formações adjacentes ou próximas nas quais ocorrem mineralizações associadas à intrusão. O comportamento espectral dos alvos geológicos identificados realçou as anomalias espectrais nas imagens por meio de operações aritméticas entre bandas, da aplicação da técnica de análise das componentes principais e a geração de composições coloridas RGB. Nestas imagens, que permitiram a visualização das anomalias, se procedeu à seleção preliminar dos alvos a serem vistoriados em campo. Para refinamento da seleção foi utilizado um mapa de lineamentos construído a partir da aplicação de filtros direcionais nas imagens, seguido da fotointerpretação. A verificação em campo das áreas selecionadas por esta técnica confirmou algumas ocorrências de rochas hidrotermalizadas, algumas com sulfetos ou fortemente alteradas. Algumas ocorrências de feições espectrais distintas nas imagens não foram relacionadas à alteração em campo. As assinaturas espectralradiométricas de algumas amostras, obtidas em laboratório, quando comparadas com padrões minerais, permitiram estabelecer a correlação dessas feições espectrais com os alvos observados nas imagens. Dados de petrografia em rochas vulcânicas, piroclásticas, hipabissais e plutônicas permitiram caracterizar a alteração propilítica com a dominante destacando-se clorita, epidoto e carbonato como fases de alteração. Esses resultados sugerem que a aplicação do sensoriamento remoto na identificação de alterações hidrotermais na região de Lavras do Sul permite identificar novos alvos para prospecção. Estudos mais detalhados, com imagens de sensores hiperespectrais, podem auxiliar no mapeamento das zonas de alteração fornecendo importantes subsídios para trabalhos de prospecção mineral e o estudo da gênese das mineralizações.

Palavras-chave: alteração hidrotermal, sensoriamento remoto, Lavras do Sul

## ABSTRACT

Occur in the region of Lavras do Sul (RS), mineralization of gold and base metals, disseminated and filonous, associated with areas of hydrothermal alteration. The work aims at identifying, in the region, areas with hydrothermal alteration not mapped, through the use of remote sensing techniques. In a scene from the sensor TM/Landsat-5 spectral features were identified in an area where is located an old gold mine in the region, the Bloco do Butiá, located 3 km to the west of the city of Lavras do Sul, which is selected as the area pilot and used as a guide in interpreting the images to have the zones of alteration, paragenesis and structures already described in the literature. The images were generated from the set of six spectral bands from the scene of sensor TM/Landsat-5 obtained in 1986, years of low rainfall, through processing and analysis of digital and analog products. A scene ASTER was used but did not provide satisfactory results in the context of the project. The Subscene used was scaled in order to cover the Complexo Intrusivo Lavras do Sul and the main formations adjacent or near where mineralization occurs associated with the intrusion. The spectral behavior of the targets was identified through enhancements in the images, arithmetic operations between bands, the technique of principal components and the generation of RGB color compositions, which allowed their view on which are carried out preliminary selection of targets to be surveyed in field. To refine the selection we used a map of lineaments constructed from the application, on the images, of linear directional filters and by remote sensing. The scanning on field of the selected areas by this technique confirmed the occurrence, in some of the targets, of rocks with hydrothermal alteration, with some sulfides or heavily modified, and the occurrence of distinctive features in some areas not related to the alteration. The spectral signatures of the samples obtained in the laboratory were compared with standard minerals and partially succeeded in establishing its correlation to the spectral features of targets observed in the images. Data of petrography in volcanic, pyroclastic, hypabissal and plutonic rocks allowed to characterize the changes as propilitizações with the predominance of chlorite, epidote and carbonate as alteration phases. The results suggest that the application of remote sensing in identifying hydrothermal alterations in Lavras do Sul is feasible. More detailed studies with hyperspectral images can help in mapping the areas of alteration and provide important insights into mineral prospecting and study of the genesis of the mineralization.

Keywords: hydrothermal alteration, remote sensing, Lavras do Sul

## LISTA DE ABREVIATURAS

CILS – Complexo Intrusivo Lavras do Sul

CP – Componente principal

DN – Número digital, do inglês *digital number*

HL – Projeto Hidrotemalismo Lavras

PBE – Projeto Biblioteca Espectral

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SWIR – espectro de radiação infravermelho de ondas curtas, do inglês *short wave infrared*

TIR – espectro de radiação infravermelho termal, do inglês *termal infrared*

VNIR – espectro de radiação com comprimento de ondas do visível ao infravermelho próximo, do inglês *visible to near infrared*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Minas, prospectos e ocorrências na região de Lavras do Sul (fonte: Geobank CPRM e carta metalogenética de Cachoeira do Sul, CPRM 1:250.000).....	17
Figura 2: Localização da área de estudo e principais vias de acesso. ....	18
Figura 3: Mapa geológico da região de Lavras do Sul (modificado de Gastal, 2006a).....	24
Figura 4: Comparação das cenas ASTER e TM em composições similares: (a) Composição RGB 532 ASTER e (b) composição RGB 741 TM . É marcante a escassez da cobertura vegetal (em verde) na cena TM. ....	30
Figura 5: (a) processo de formação das cores e (b) sensibilidade visual. As elipses representam áreas de "mesma cor" para o olho humano (modificado de Crósta, 1992). ....	33
Figura 6: Equações típicas para imagens TM na linguagem do software ENVI. ....	34
Figura 7: Filtros direcionais de Sobel.....	35
Figura 8: Fotomosaico das fotos na escala 1:60.000 com sobreposição da base cartográfica assinalando a área do mestrado e fotoíndice geral para as fotos 1:60.000 e 1:110.000. ....	38
Figura 9: Geometria de aquisição dos dados de espectrorradiometria.....	39
Figura 10: composição TM RGB 741 com a seleção preliminar dos pontos com resposta visual semelhante à área do Bloco do Butiá.....	43
Figura 11: (I) Cena TM classificada pelo método da distância de Mahalanobis. (a) e (b) áreas de mesma classe distinguíveis pela morfologia. (a) lavoura e (b) área alvo próxima a lineamento de escala regional.....	44
Figura 12: Imagem CP2 com valores altos de DN's para vegetação.....	48

Figura 13: Composição RGB das CPs 541 com as áreas alvo em tons de vermelho e magenta. ....	50
Figura 14: Lineamentos assinalados por fotointerpretação nas escalas 1:60.000 e 1:110.000. ....	51
Figura 15: Pontos selecionados para vistoria em campo.....	52
Figura 16: Montagens panorâmicas da área da mina Bloco do Butiá: a) cava principal e b) aspecto geral do terreno no entorno, com trincheiras e valas. ....	55
Figura 17: Ponto HL-17-4. A linha tracejada marca a provável orientação do dique. a) monzonito com megacristais de k-feldspato e b) monzogranito. ....	59
Figura 18: a) afloramento no ponto HL-18-1; b) detalhe do veio de quartzo; c) granito filitizado com quartzo hidrotermal e óxidos de ferro; d) aspecto geral da área no entorno com quartzo leitoso e nódulos de hematita espalhados; e) ponto HL-18-2 e f) ponto HL-18-3.....	61
Figura 19: Visão geral do afloramento no ponto PBE-01-2.....	65
Figura 20: Aspecto do terreno no ponto PBE-01-7. O perfil de solo é pouco espesso conservando a umidade do solo logo acima da rocha.....	66
Figura 21: a) vista geral da área aflorante no ponto HL-40-1; b) falha inversa em megabloco granítico; c) vista panorâmica da área do Ponto HL-40-1 a partir do ponto HL-40-2.....	67
Figura 22: Curvas espectrais das amostras coletadas. ....	91
Figura 23: Curvas espectrais para alguns minerais descritos como produtos da alteração hidrotermal na ASLS (exceto hornblenda). ....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: dimensões das janelas utilizadas, em pixels e metros.....	32
Tabela 2: Classes estabelecidas e número de pixels por amostra .....	42
Tabela 3: Análise da dimensionalidade dos DN's da cena. ....	45
Tabela 4: Análise da distribuição da informação nas CP's resultantes.....	46
Tabela 5: Análise da correlação (covariância normalizada) entre as bandas do conjunto original.....	46
Tabela 6: Análise da contribuição relativa de cada banda às PC's. ....	46
Tabela 7: Lista dos pontos descritos.....	53
Tabela 8 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de pirita .	78
Tabela 9 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de arsenopirita.....	79
Tabela 10 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de calcopirita. ....	79

# 1 INTRODUÇÃO

A origem da cidade de Lavras do Sul vincula-se as atividades de extração mineral desde o final século XVIII onde nos primórdios da mineração a garimpagem levou (o fato não documentado) “...a descoberta uma grande pepita de ouro com o formato da imagem de Santo Antônio, num remanso do arroio Camaquã, que hoje banha a cidade. Por essa razão aquela garimpagem recebeu o nome da Santo Antônio das Lavras ficando como padroeiro da localidade o milagroso santo ([www.panoramalavrense.com.br](http://www.panoramalavrense.com.br), acessado em 7 de janeiro 2012)”. Esta notícia e a suposta semelhança do solo local com as terras de Mato Grosso e Minas Gerais atraiu interessados destas regiões sendo em 1796, a primeira descoberta de ouro em Lavras dando origem a colonização do município e a exploração da mineração aurífera. A descoberta de ouro na região atraiu colonizadores portugueses, belgas e espanhóis formando um núcleo populacional, que deu origem a cidade. Há registros de que o ouro do território foi também explorado por europeus e canadenses. Inicialmente a área do município vinculava-se administrativamente aos municípios de Rio Grande e Rio Pardo, período em que a província de São Pedro possuía apenas os municípios de Santo Antônio da Patrulha , Rio Grande , Rio Pardo e Porto Alegre. Após passou a pertencer ao território de Caçapava do Sul e promovida a Vila de Santo Antônio das Lavras em 1882 e, finalmente, em 1938 recebe o *status* de cidade com o nome de Lavras do Sul. O nome da cidade derivou da divisão de glebas destinadas à mineração (lavra) do ouro e adicionou-se a expressão "do Sul", por já existir uma cidade denominada Lavras, em Minas Gerais. Segundo o site [www.panoramalavrense.com.br](http://www.panoramalavrense.com.br)... “As disputas pelas terras conquistadas por Portugal e Espanha originaram tratados de limites como os de Madri e de Santo Ildefonso que tiveram suas linhas determinadas em documentos e posteriormente demarcadas, pois a linha do Tratado de Santo Ildefonso curiosamente faz uma curva sobre o território de nosso município, justamente sobre o distrito aurífero deste; e, as linhas dos dois tratados unem-se justamente sobre o território do município de Lavras do Sul, formando um vértice histórico...”.

A partir da metade do século XIX se tem registro de empresas mineradoras atuando nesta região (The Rio Grande do Sul Mining Company, 1845-1855; *Brazilian Gold Field Limited*, 1900-1914; Companhia Belga, 1902-1909). Dados de produção, embora questionáveis, demonstram o potencial aurífero de Lavras do Sul, como os da Empresa Mineradora Serapião de Freitas Souza, que no período de 1935-1947 extraiu, por meio de técnicas rudimentares, 125 kg de ouro, com um teor médio de 10 g/ton. Durante este período, e ainda hoje, a extração de ouro foi também realizada de forma clandestina por pequenos proprietários e garimpeiros, o que dificulta uma estimativa, mesmo que aproximada, da produção global de ouro até o momento.

Entre 1959 e 1963, o Departamento de Produção Mineral retomou as atividades de pesquisa na região de Volta Grande, objetivando principalmente a mineralização cuprífera. A partir de 1973 esta mesma área começou a ser reativada pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), que dirigiu seus objetivos para a mineralização de ouro nas porções aluvionares e Aurocupíferas das rochas vulcano-sedimentares e graníticas de Lavras do Sul. Os resultados da pesquisa realizada pela CRM são apresentados na Tabela 5.

Os estudos referentes à origem da mineralização são ainda controvertidos, motivo, portanto, de inúmeras discussões. Alguns autores atribuem a origem das mesmas às soluções residuais do magmatismo granítico (Barbosa e Constantino, 1961), enquanto outros, como Ribeiro et. al. (1966), sugerem uma possível contribuição das rochas vulcânicas, através de processos de remobilização. Kaul e Zir F° (1974) consideram que a mineralização aurífera possa estar geneticamente associada às rochas graníticas da região, enquanto a mineralização cuprífera estaria associada às rochas vulcânicas da Formação Hilário.

A mineralização presente no Complexo Granítico Lavras foi descrita por Teixeira e Leinz (1942), Goñi (1961) e Reischel (1980). Na área de Volta Grande e Vista Alegre, Goñi (1961) reconheceu a presença de pirita, calcopirita, hematita, calcosina, bornita, covelita, blenda, galena, além de ouro e prata, ao longo de filões e zonas brechadas.

O controle estrutural das zonas mineralizadas pode ser constado tanto nas rochas graníticas como na seqüência vulcano-sedimentar. Reischel

(1980) observou que, nas zonas centrais e transicionais do Complexo Granítico Lavras, as mineralizações aurífera e sulfetada são controladas por fraturas de direção N 60° E, enquanto que, nas rochas da borda do referido complexo, estas estão disseminadas ao longo de fraturas de direção E – W. Na seqüência vulcano-sedimentar, ambas as mineralizações acima se dispõem preferencialmente segundo as fraturas de direções N 60-75° W e E-W.

Um levantamento geofísico realizado pela CRM, utilizando métodos de polarização induzida espontânea e magnetometria, confirmou este controle e acusou a presença de inúmeras estruturas mineralizadas de dimensões variadas. As mineralizações, sulfetada e aurífera, ocorrem ao longo de filões brechados, brechas mineralizadas, veios de quartzo e, de forma subordinada, como disseminação de pequena expressão nas porções laterais destas estruturas. Este mesmo condicionamento é encontrado nas rochas do Complexo Granítico Lavras, com a diferença de que, neste, a forma disseminada é mais expressiva do que nas rochas vulcânicas. Kaul e Zir F° (1974) classificaram a mineralização associada às rochas vulcânicas de Lavras do Sul como tipo filoniano e disseminado. Segundo estes autores, o tipo disseminado refere-se a toda a mineralização associada a milonitos e brechas tectônicas nas bordas das encaixantes vulcânicas em contato com filões, além da mineralização contida no horizonte A do solo.

O número relativamente grande de trincheiras disponíveis realizadas na década de 80 pela CRM (Companhia Riograndense de Mineração) na fase de pesquisa na área da Merita e Volta Grande, possibilitou a observação mais detalhada das zonas mineralizadas e dos filões. Estes geralmente se estendem por dezenas de metros e tem uma possança de poucos centímetros. Uma zona superior, com um avançado grau de oxidação, é geralmente presente e, na maior parte dos casos, responsável pela total destruição dos sulfetos pré-existente. Nestas zonas, excepcionalmente, é encontrado ouro livre. Azevedo e Mello (1982) descreveram a mineralização filoniana de Volta Grande e denominaram esta porção oxidada de zona superior, caracterizando-a em função do estado de oxidação e da presença de argilo-minerais, óxidos de hidróxidos de ferro em abundância.

As estruturas mineralizadas de maior possança da área da Merita são constituídas por zonas de fraturas, com predominância de microbrechas e, subordinadamente, milonitos (Higgins, 1971). Essas litologias foram invadidas por soluções hidrotermais, responsáveis pelo desenvolvimento extensivo de fases tais como carbonato, clorita e epidoto. Nas porções onde ocorre a mineralização sulfetada, a ganga é geralmente constituída por carbonato, clorita e epidoto; em alguns casos, apenas por estes dois últimos.

Identificou-se uma zonação geoquímica das bordas do Complexo Granítico Lavras em direção às rochas vulcânicas da Formação Hilário na região de Volta Grande, conforme indicada por Lima (1985a). Os sulfetos de cobre dominam nas rochas vulcânicas próximas à borda do referido complexo e a mineralização de sulfetos de chumbo e zinco e, ainda, de prata, se concentram nas rochas vulcânicas mais distantes deste contato. Esta zonalidade marca provavelmente diferenças na profundidade de colocação dos termos plutônicos e vulcânicos. Durante a fase de mapeamento e o estudo de seções polidas, Lima (1985a) constatou que a mineralização é constituída por galena (argentífera), blenda, pirita, calcopirita e specularita.

O ouro livre foi encontrado em apenas duas amostras, provenientes das porções oxidadas dos filões ou em rochas monzoníticas (Liz *et al.* 2004). A presença deste metal foi também constatada na forma de inclusões em piritas por Goñi (1961) na região de Lavras do Sul. Este fato concorda com as observações de Azevedo e Melo (1982) que registraram a presença de pirita com teores elevados de ouro na região de Volta Grande. Este tipo de associação tem sido observado por diversos autores (Lindgren, 1933; Berman *et al.* 1973; Cuddy e Kesler, 1982, entre outros), tanto em mineralizações filonianas como em jazimentos do tipo cobre pórfiro. Boyle (1979), referindo-se à presença de ouro em piritas, sugere duas possibilidades para esse tipo de ocorrência. Na primeira delas o ouro estaria combinando quimicamente na estrutura da pirita, e na outra esse metal ocorreria sob a forma de inclusões muito finas, freqüentemente submicroscópicas ( $< 0,1\mu$ ).

A presença de ouro e metais básicos na região explica, portanto, o grande interesse de diversos autores e a extensa base de informações geológicas e de produção bibliográfica desta área (Fig. 1). As investigações geológicas envolvendo petrologia e potencial metalogenético na região de

Lavras do Sul (Nardi e Lima 1985) indicam a importante correlação entre mineralizações e rochas de afinidade shoshonítica e pela estreita relação entre este tipo de sistema com mineralizações de sulfetos de Cu, Pb, Zn e Au, em geral vinculados a modelos metalogenéticos do tipo cobre-pórfiro. A região caracteriza-se pela ocorrência, na zona central, de um conjunto de rochas shoshoníticas que apresentam mineralizações auro-cupríferas associadas a um modelo tipo cobre-pórfiro (Nardi e Lima, 1988; Mexias *et al.* 1994; Remus *et al.*, 2000). Este contexto evidencia a potencialidade da região para trabalhos de prospecção.

A utilização de imagens de sensoriamento remoto como ferramenta em trabalhos de prospecção e caracterização remota de alvos em regiões cuja densidade da cobertura vegetal é alta apresenta algumas dificuldades inerentes ao método de obtenção dos dados. Assim, a observação da baixa interferência desta componentente em uma cena do sensor TM/Landsat-5 de 1986, aliada ocorrência de feições espectrais características próximas a áreas de mineração justificou o trabalho realizado.

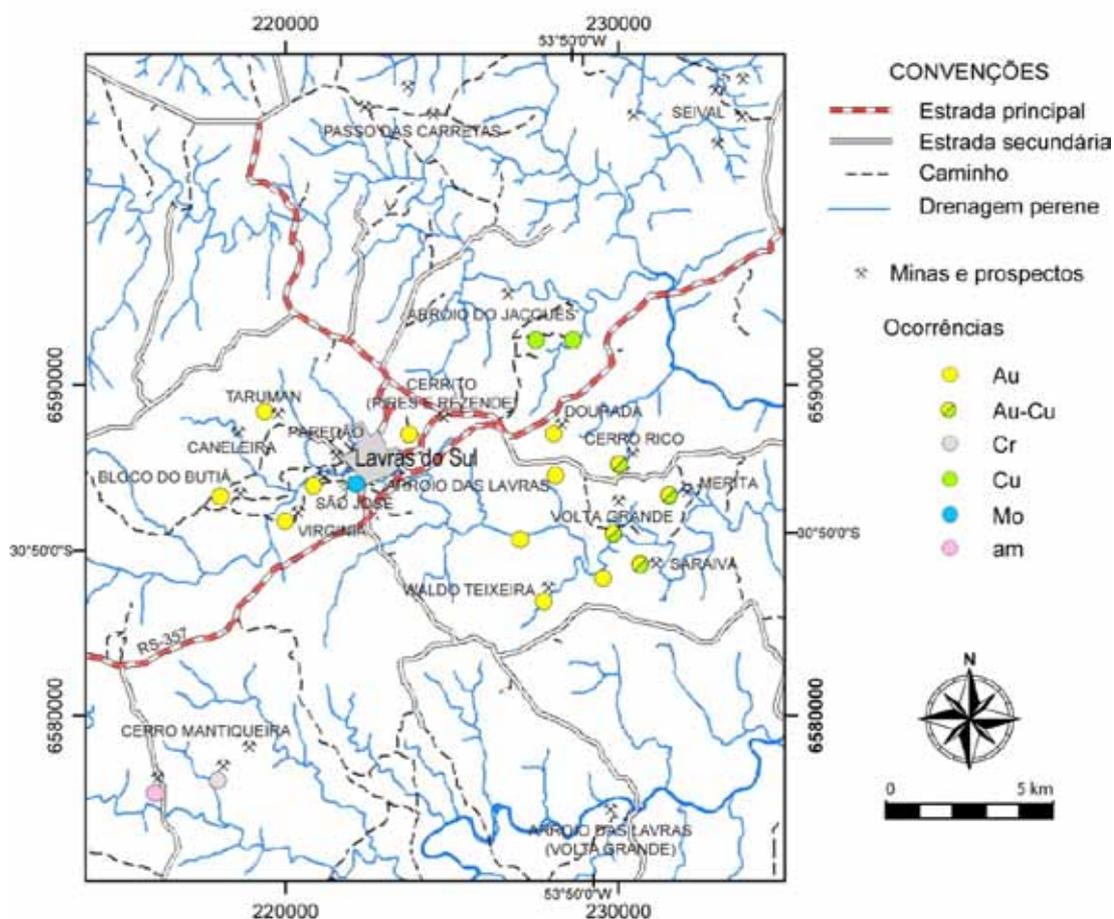


Figura 1: Minas, prospectos e ocorrências na região de Lavras do Sul (fonte: *Geobank* CPRM e carta metalogenética de Cachoeira do Sul, CPRM 1:250.000)

## 1.1 Localização da área

A área de estudo está localizada na região de Lavras do Sul, na porção oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense, distando aproximadamente 300 km de Porto Alegre. A investigação abrangeu uma área inicial de 900 km<sup>2</sup> na região, limitada pelas coordenadas UTM E244000 e E214000, e N6600000 e N6570000, Datum Córrego Alegre, Fuso 22, estando a cidade de Lavras do Sul, sede do trabalho de campo, localizada no centro-oeste da área (Fig. 2). De Porto Alegre, pode-se chegar à cidade acessando-se a BR-290 e a seguir a BR-392 até a cidade de Caçapava do Sul e a partir daí via RS-357, até a cidade de Lavras do Sul.

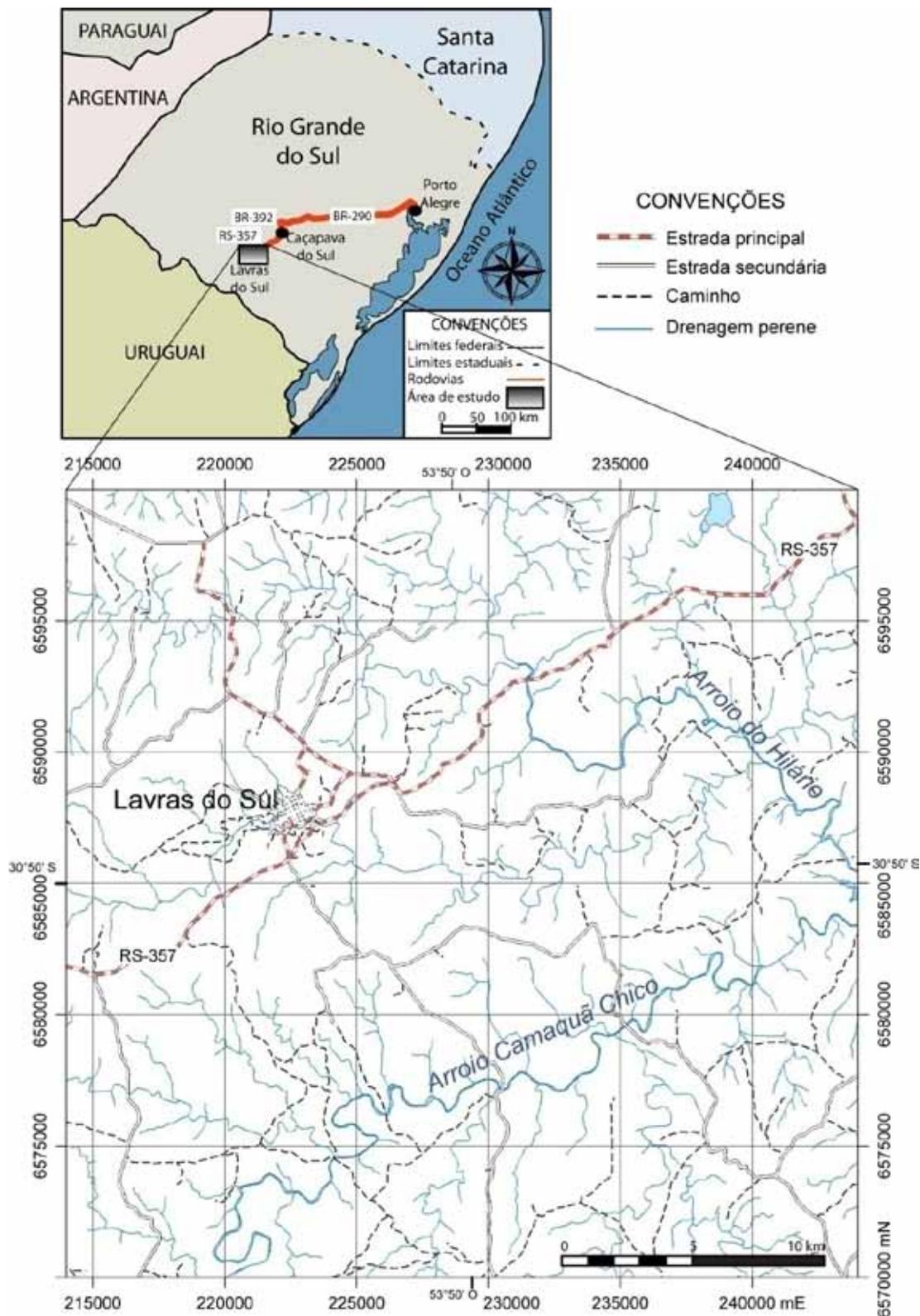


Figura 2: Localização da área de estudo e principais vias de acesso.

## 1.2 Contexto geológico e caracterização do problema

As diversas associações magmáticas expostas no sul do Brasil foram geradas durante o Ciclo orogênico Brasileiro/Pan Africano. Este inclui a subducção de crosta oceânica (800 - 700 Ma), colisão entre continente e arco magmático (ca. 700-500 Ma), importantes na consolidação do supercontinente Pangea (Brito Neves e Cordani 1991). A colisão (*thrusts* e metamorfismo de alta pressão, Liégeois 1998) é seguida por uma fase pós-colisional com a geração de zonas de cisalhamento e ascensão de isothermas, responsáveis pela geração de um amplo espectro de magmas (Bonin *et al.* 1998, Liégeois, 1998; Cottin *et al.* 1998). A fase pós-colisional no sul do Brasil, segundo Bitencourt e Nardi (1993, 2000), caracteriza-se por um intenso magmatismo marcado por grandes movimentos horizontais de blocos ao longo de zonas de transcorrência. O magmatismo pós-colisional é marcado pela afinidade toleítica ou cálcico-alcalino médio a alto-K (650-620 Ma), seguido por rochas peraluminosas. Estes episódios são sucedidos por um magmatismo de afinidade shoshonítica (610-585 Ma) e alcalino saturado em sílica a peralcalino (595-560 Ma).

As rochas neoproterozóicas de afinidade shoshonítica do Rio Grande do Sul foram agrupadas por Lima e Nardi (1985) na Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS) e tem sido objeto de estudos por diversos autores (Lima, 1985; Nardi e Lima, 1985; Mexias *et al.*, 1994; Lima, 1995; Lima e Nardi, 1998; Remus *et al.* 2000; Gastal e Lafon, 2001; Gastal *et al.* 2002; Bongioiolo *et al.* 2003, Gastal *et al.* 2004; Janikian 2004, Liz *et al.* 2004; Liz *et al.* 2005; Mexias *et al.* 2005, Gastal e Lafon 2006, Gastal *et al.* 2006, Bongioiolo *et al.* 2007, entre outros).

A geologia desta região é apresentada na figura 3. A ASLS tem uma idade em torno de 591 Ma (Liz *et al.* 2009) agrupa derrames de traquibasaltos potássicos e shoshoníticos (traquiandesitos potássicos) além de depósitos piroclásticos de queda e fluxo. Toda esta seqüência é cortada por diques latíticos a riolíticos, além de intrusões monzoníticas a granodioríticas rasas e lamprófiros espessartíticos. Os monzonitos concentram-se principalmente na borda nordeste onde assumem uma

geometria semicircular, semelhante às intrusões vinculadas a caldeiras vulcânicas (Lipman 1997, 2000) e circundam parcialmente o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), (Gastal e Lafon, 1998). Este cenário geológico de um magmatismo potássico em um ambiente de caldeira potencializa a investigação detalhada da região de Lavras do Sul. Diversos trabalhos mostram a estreita relação entre o magmatismo shoshonítico com mineralizações de sulfetos de cobre e ouro, em geral vinculados a sistemas do tipo cobre-pórfiro. Cerca de 20% dos maiores depósitos de ouro do mundo (pórfiro e epitermal) estão relacionados aos latitos e/ou monzonitos de afinidade shoshonítica (Müller e Groves 1997). Outras ocorrências como as de Kalamazzo e São Manuel no Arizona (Chaffee 1982), Highland Valley-British Columbia no Canadá (White e Herrington 2000), Lihir Island na Papua New Guinea (Müller e Groves 1997) e Complexo Vulcânico Goonumbra na Austrália (Heithersay e Walshe 1995) ilustram esta vinculação. Este contexto geológico é semelhante ao de Lavras do Sul e os dados preliminares indicam a presença de ouro e sulfetos de Cu, Pb e Zn nas rochas shoshoníticas. A origem destas foi discutida por Nardi e Lima (1988), Mexias et al.(1994), Hartmann *et al.* (1999) e Remus *et al.* (2000), e atribuída a um sistema do tipo cobre-pórfiro com uma zonalidade na alteração, que varia desde a propilitização até uma zona potássica.

Outro fato, geologicamente relevante da área, é a transição e contemporaneidade entre o magmatismo shoshonítico e o alcalino sódico, sendo estas manifestações finais marcadas por um importante incremento no gradiente geotermal da área. Este pode ter contribuído na remobilização de ouro e de metais básicos por ação do hidrotermalismo e na geração das mineralizações de ouro e sulfetos na região de Lavras do Sul (Liz *et al.* 2004). Esta hipótese é coerente com os dados geocronológicos apresentados por Bongioiolo *et al.* (2003; 2007), que identificou mineralizações com a idade do magmatismo sódico, o que potencializa a ocorrência de mineralizações da área.

O presente trabalho dá continuidade às investigações de Senhorinho (2009) que foram realizadas na região de Lavras do Sul. Parte do material exposto neste volume, especialmente materiais e métodos e descrições de campo foram extraídos do trabalho anteriormente mencionado.

As modificações na composição química original das rochas da região estão relacionadas à alteração hidrotermal, ligada a um sistema tipo cobre-pórfiro (Nardi e Lima, 1988; Mexias *et al.*, 1994; Remus *et al.*, 2000). Faltam, no entanto, trabalhos que integram dados de petrologia, litoquímica das zonas de alteração e dados estruturais visando à definição de parâmetros de identificação e localização remota de áreas potencialmente mineralizadas. Os dados de sensores orbitais têm sido utilizados com êxito em terrenos vulcano-plutônicos no RS (Pinheiro-Sommer *et al.*, 2006) auxiliando no reconhecimento e delimitação de feições morfo-estruturais e litologias.

O sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de técnicas relacionadas à aquisição de dados por sensores distantes dos alvos. Os sensores passivos captam a radiação eletromagnética (REM), proveniente do Sol após sua interação com a matéria. Esta radiação resultante da interação constitui-se no vetor da informação sobre a superfície terrestre. Existem ainda, os sensores ativos que emitem e captam a REM após sua interação com os alvos terrestres. Esta técnica pode ser empregada, ao longo de um trabalho, no reconhecimento prévio de áreas estudadas, como guia de prospecção e no refinamento de trabalhos de mapeamento básico. Neste trabalho o sensoriamento remoto é utilizado como ferramenta principal na prospecção de áreas com alteração hidrotermal que possuam padrões espectrais correlacionáveis com áreas conhecidas, sendo estas utilizadas como guias prospectivos na interpretação. É uma abordagem limitada por alguns fatores inerentes a natureza da interação da REM com os alvos e também por limitações dos próprios sensores utilizados. Traz consigo, no entanto, algumas vantagens, dentre as quais se destaca a capacidade de aquisição rápida de grande quantidade de informação, a baixo custo relativo, e a possibilidade de integração desses dados com outros de diferentes fontes. Técnicas de geoprocessamento permitem, portanto, não só a integração dos dados, mas a sua visualização e o processamento simultâneo de dados quantitativos e qualitativos provenientes de diversas fontes (levantamentos de geologia, estrutural, geoquímica, imagens de satélite, altimetria, etc). Essas ações geram uma base de dados eficiente para as interpretações e análises geológicas. Deste modo, os dados obtidos neste trabalho foram compilados em um SIG (Sistema Geográfico de Informações)

onde se efetuou parte do refinamento dos dados e na definição dos alvos visitados em campo.

O alvo potencial para este estudo, adotando-se esta abordagem, é a região de Lavras do Sul, onde rochas hipoabissais, predominantemente monzoníticas, ocorrem na porção leste do CILS.

Estudos realizados em duas ocorrências monzoníticas na região de Lavras do Sul identificaram mineralizações auro-cupríferas geradas em temperaturas em torno de 500°C (Liz *et al.*, 2004). Este fato aliado à expressiva ocorrência de depósitos tipo cobre-pórfiro relacionada aos monzonitos de afinidade shoshonítica sob condições ricas em voláteis, tais como o Complexo Vulcânico Goonumbla na Austrália, permitem sugerir que litotipos semelhantes constatados na região de Lavras do Sul possam representar alvos importantes para a prospecção de Cu e Au, conforme sugerido por Nardi e Lima (1988) e Remus *et al.* (2000). Diversos autores (Heithersay e Walshe, Müller e Groves, Lickfold, apud Liz *et al.*, 2004) argumentam que a vinculação entre sistemas do tipo pórfiro ou Au epitermal e magmatismo shoshonítico deve-se à elevada temperatura destes magmas e a derivação mantélica com pouca contaminação crustal. De acordo com estes autores, o tipo de diferenciação magmática da série shoshonítica, onde os termos básicos a intermediários evoluem a partir da extração de fases minerais anidras sob baixas pressões, favorece a manutenção dos voláteis no segmento mais diferenciado (monzonítico) permitindo o desenvolvimento de depósitos do tipo pórfiro. Esta evolução magmática e a origem mantélica foram admitidas para explicar a geração dos diferentes tipos de rochas da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (Nardi e Lima, 2000). Os dados obtidos comparados a depósitos tipo cobre-pórfiro vinculados a caldeiras, como Goonumbla (Austrália), permitem sugerir que sistemas subvulcânicos monzoníticos metaluminosos de afinidade shoshonítica, em zonas de recargas magmáticas e sob condições ricas em voláteis, podem representar sítios preferenciais para mineralizações cobre-pórfiro ricas em Au (Liz *et al.*, 2004). A aplicação de sensoriamento remoto para investigação dos lineamentos da porção central do Escudo Sul-Rio-Grandense foi apresentada por Carraro e Mexias (2005).

A área da mina Bloco do Butiá, por apresentar minério disseminado, foi selecionada para comparação, pois se diferencia das demais ocorrências minerais da região, que são tipicamente filoneanas. Estas mineralizações localizadas a 4.500 m a WSW de Lavras do Sul, segundo Ferran (1997) foram trabalhadas antes de 1936 pela companhia belga, que efetuou trincheiras e algumas galerias nos locais então denominados de Guampa de Ferro, Guarda Mór, Boa Vista, Saint Clément e Bloco do Butiá. Algumas destas áreas foram posteriormente pesquisadas com mais detalhes pela CBC. Uma delas, segundo Feerran (1997) ...” é a *mina do Bloco do Butiá propriamente dita, onde estão as maiores escavações antigas. Até a profundidade de 100 metros, foram cubadas 1,1 Mt com 1,3 g Au/t, resultando 1 430 kg de ouro contido. Ocorre que este teor provém da média de teores muito perto desta média, o intervalo mais rico conhecido sendo um valor isolado de 1 m com 12,8 g Au/t. Assim não se pode esperar muito de lavra seletiva para aumentar o teor médio em lavra, o que torna esta reserva marginal...*”

Ocorrem na área três fácies do CILS, monzogranítica, sienogranítica e no pertita granitos faixas mais alteradas hidrotermalmente concentradas principalmente no pertita granito.

Nardi (1984) e, posteriormente, Mexias (2000) identificaram as seguintes alterações hidrotermais nesta área:

è Propilitização: transformação de anfibólio em clorita ferrosa + quartzo + calcita + anatásio + monazita, circundando as áreas mineralizadas.

è Epissienítica: rocha formada pela dissolução seletiva do quartzo, substituição por carbonato, com posterior alteração fílica com pirita e ouro.

è Cloritização: deposição de clorita ferrosa II nas cavidades dos epissienitos.

è Alteração fílica: principal processo de alteração e mineralização com cristalização de fengita e destruição do feldspato potássico magmático.

è Carbonatação: cristalização de calcita e clorita ferrosa III.

A metodologia empregada neste trabalho utilizou como guias, parâmetros mineralógico-estruturais na interpretação das imagens e seleção de alvos.

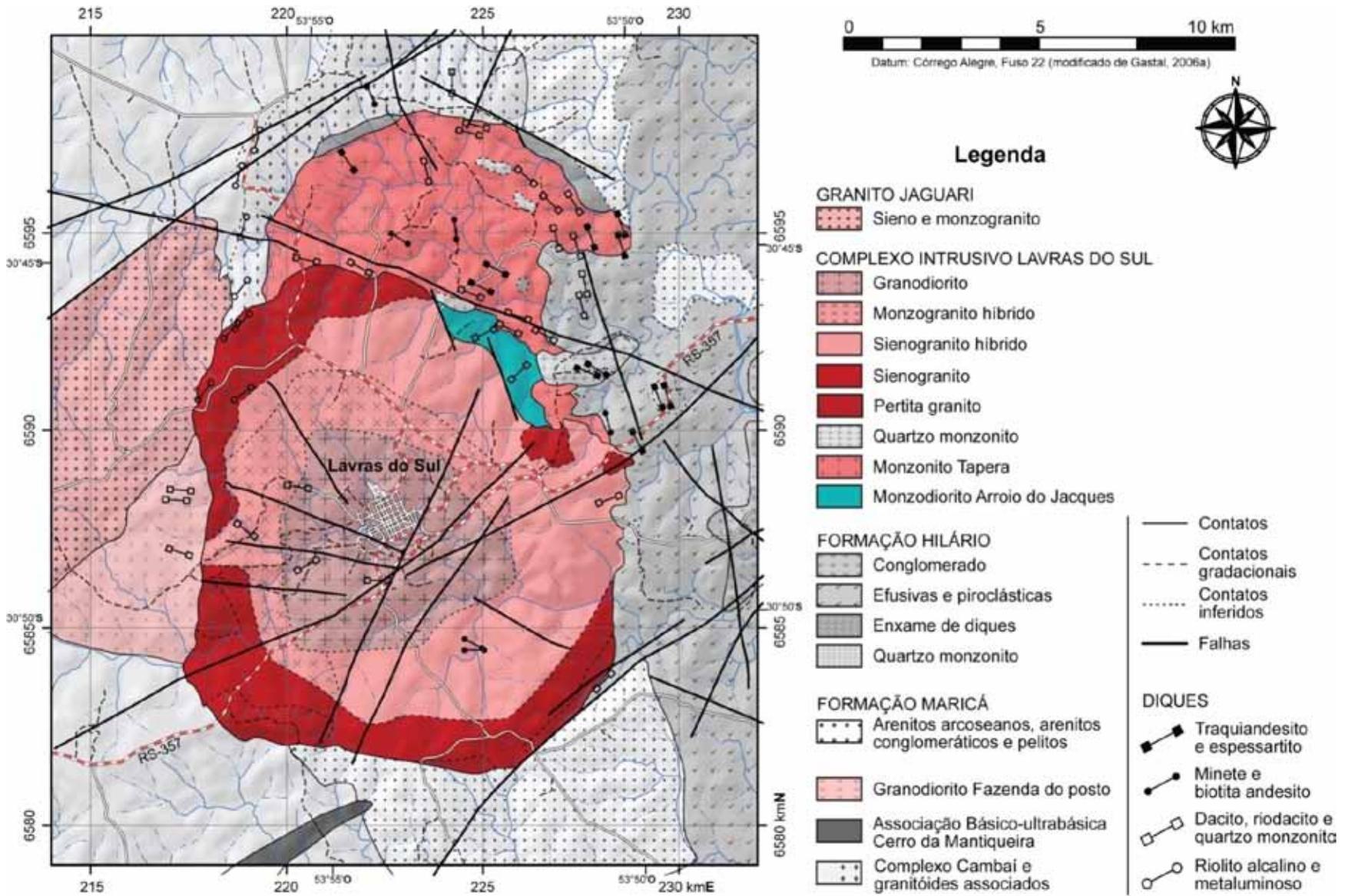


Figura 3: Mapa geológico da região de Lavras do Sul (modificado de Gastal, 2006a).

### 1.3 Objetivos

O presente mestrado dá continuidade na interpretação e discussão dos dados e resultados obtidos por Senhorinho (2009) e visa contribuir nos métodos de identificação e investigação de áreas com alteração hidrotermal na região de Lavras do Sul através do uso de sensoriamento remoto aliado a informações qualitativas e quantitativas obtidas em pesquisa bibliográfica, espectrorradiometria, fotointerpretação e petrografia. Estes dados são utilizados para a geração de modelos de distribuição espacial de dados em *n* dimensões em ambiente SIG. Esses modelos auxiliam no entendimento e na definição dos padrões de distribuição espacial de variáveis, como litotipos ou padrões estruturais, que podem contribuir para o entendimento da evolução de eventos geológicos, tais como: deformações, mecanismos de posicionamento de corpos ígneos ou mesmo alterações. Esta espacialização de dados, em um único ambiente, permite a integração e a análise das informações provenientes de diferentes fontes. O trabalho proposto visa à utilização dessas ferramentas na análise de dados de sensoriamento remoto, geologia de campo, geomorfologia e petrografia tendo por objetivo a identificação e a caracterização do ambiente das alterações hidrotermais associadas ao magmatismo e as mineralizações na região de Lavras do Sul. Essa reconstrução do ambiente permitirá o desenvolvimento de um modelo prospectivo envolvendo técnicas de sensoriamento remoto e a definição de novas áreas potenciais para a prospecção de minérios.

A compilação de informações de bibliografia e a aquisição, o tratamento e a interpretação de novos dados permitiram a elaboração desta dissertação de mestrado cujos objetivos específicos podem ser resumidos em:

1º - Identificação de áreas com alteração hidrotermal através do uso de dados de sensoriamento remoto integrados a dados obtidos em pesquisa bibliográfica.

2º - Caracterização do tipo de alterações identificadas através de estudos de petrografia para definição de paragêneses.

3° - Definição de padrões e assinaturas espectrais das áreas hidrotermalizadas para auxiliar na geração de um modelo prospectivo baseado em sensoriamento remoto.

4° - Definição de critérios que permitam dar apoio a trabalhos de prospecção mineral na região de Lavras do Sul.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos selecionados para a abordagem do problema são descritos neste capítulo acompanhados por uma breve descrição dos objetivos e resultados esperados em cada etapa.

### 2.1 Revisão bibliográfica

Nesta etapa foi realizado um levantamento de trabalhos publicados referentes ao tema do mestrado e à área a ser estudada. A partir desse aporte técnico metodológico nas etapas seguintes foram sendo executadas as rotinas para a efetivação do estudo proposto. Os elementos técnicos adquiridos foram utilizados posteriormente como guias nas interpretações e no reconhecimento:

- § da evolução do conhecimento da geologia regional e local;
- § dos trabalhos relacionados às mineralizações e à mineração:
  - Ocorrências descritas na região
  - Tipos de alteração presentes e morfologia dos corpos
  - Estruturas associadas (falhas, fraturas)
  - Modelos metalogenéticos propostos
- § das aplicações de técnicas de sensoriamento remoto em áreas semelhantes.

### 2.2 Sensoriamento Remoto

O processamento de imagens de satélite foi realizado para a identificação de áreas com respostas espectrais semelhantes à área da mina Bloco do Butiá, localizada a oeste da cidade de Lavras do Sul, adotada como área piloto para fins de comparação visual.

Na análise visual preliminar foi utilizada uma imagem composição colorida RGB bandas TM 147 recortada da cena obtida pelo sensor TM/Landsat 5 órbita/ponto 222/81 em 15/01/1986. Nesta imagem cerca de

50 áreas foram individualizadas, tendo em vista apresentarem comportamento espectral semelhante à área tomada como referência (Bloco Butiá). A aplicação de diversas técnicas de processamento dessa imagem permitiu um refinamento deste comportamento espectral reduzindo o número de áreas a 25 e definindo os locais a serem visitados durante a etapa de campo. Os principais processamentos que contribuíram nestas definições são descritos a seguir.

O aumento de contraste das bandas espectrais para a interpretação visual das imagens foi realizado principalmente em composições coloridas geradas com as bandas originais realçadas por manipulação de histograma e imagens geradas através de operações aritméticas para maximizar as respostas espectrais de alguns alvos a fim de discriminá-los nas áreas de interesse. Para esta interpretação visual também foram utilizadas as imagens geradas pela análise das componentes principais do conjunto original.

O programa utilizado para visualização e processamento das imagens foi o ENVI 4.0 (*Environment for Visualizing Images*). Posteriormente as composições que mais destacaram as áreas anômalas foram inseridas em um SIG, para análise conjunta com outras informações.

#### Imagens TM/Landsat-5

##### ✓ Características do sensor

§ Sensor multiespectral TM (*Thematic Mapper*)

§ Resolução espectral: 7 bandas (a banda 6, no espectro infravermelho termal, não foi utilizada)

§ Resolução espacial: 30 metros

§ Resolução radiométrica: 8 bits (256 níveis)

##### ✓ Características das imagens

§ Cena WRS 222/81 de 15/01/1986

Esta cena foi obtida em um período marcado por uma prolongada estiagem no RS. Este fator é importante, pois minimiza a interferência da

vegetação que, em abundância, afeta as respostas espectrais do solo e das rochas mascarando-as (Fig. 4).

#### Imagens ASTER/Terra

##### ✓ Características do sensor

§ Sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) Terra

§ Sensor multiespectral

§ Resolução espectral: 14 bandas espectrais (3 VNIR, 6 SWIR e 5 TIR)

§ Resolução espacial: 15m para as bandas do espectro VNIR, 30m para as bandas SWIR e 90m para as TIR

§ Resolução radiométrica: 8 bits (256 níveis)

##### ✓ Características das imagens

§ Cena de 16/03/2001

Imagem da região obtida no final do verão sem feições marcantes como as observadas na cena obtida pelo sensor TM.

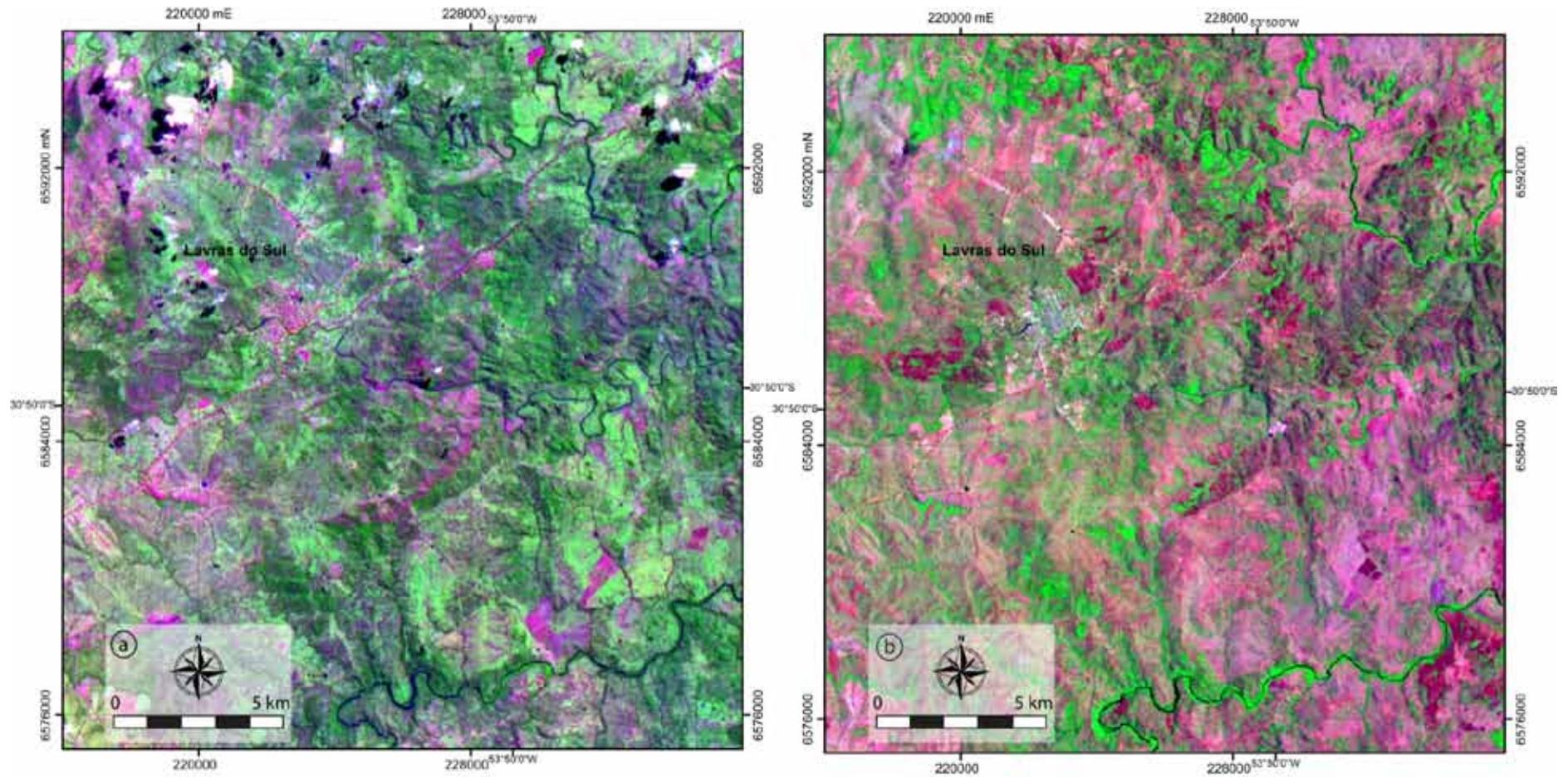


Figura 4: Comparação das cenas ASTER e TM em composições similares: (a) Composição RGB 532 ASTER e (b) composição RGB 741 TM . É marcante a escassez da cobertura vegetal (em verde) na cena TM.

A baixa resolução espectral do sensor TM (duas bandas) na região espectral do infravermelho de ondas curtas (SWIR), comumente utilizada para estudos geológicos, dificulta interpretações mais apuradas. Com vista neste aspecto, utilizou-se a cena do sensor ASTER (seis bandas no espectro SWIR) efetuando-se processamentos similares aos aplicados à cena TM. Estes processamentos não apresentaram resultados satisfatórios, pois a alta densidade da cobertura vegetal observada na época do imageamento recobre os solos e as rochas, mascarando-as. Isto se torna um fator limitante no uso desta imagem.

### **2.2.1 Pré-processamento**

Na etapa de pré-processamento as cenas foram redimensionadas para o tamanho aproximado da área de abrangência do projeto de mestrado para facilitar o processo de georreferenciamento com base em pontos de controle, obtidos nas cartas topográficas: Arroio América, Arroio Santa Bárbara, Lavras do Sul e Arroio Carajás na escala 1:50.000. Para a cena TM foram utilizados 34 pontos de controle e o erro médio quadrático (RMS) ficou próximo a 0,9 estando abaixo do erro máximo sugerido (um pixel). As bandas ASTER do espectro SWIR foram reamostradas para uma resolução espacial de 15 m a fim de utilizá-las em conjunto com as bandas do espectro visível; para a cena ASTER (VNIR e SWIR) foram utilizados 28 pontos ficando o erro médio em 0,95. Em ambos os casos foram utilizados polinômios de 2ª ordem e coordenadas do sistema UTM, datum Córrego Alegre, Fuso 22. Foi então feito o recorte final das janelas a serem utilizadas nos processamentos cujas dimensões são apresentadas na tabela 1. Este segundo recorte eliminou áreas nas imagens que ficavam fora da área de interesse e as bordas, que posteriormente poderiam interferir nos resultados de processamentos digitais.

Tabela 1: dimensões das janelas utilizadas, em pixels e metros

Sensor		Cena completa		Janela		Retângulo envolvente	
		Colunas	Linhas	Colunas	Linhas	Leste (m)	Norte (m)
TM		6623	6000	1116	1136	246000	6602000
						212500	6568000
ASTER	VNIR	4980	4200	2268	2269	246000	6602000
						212000	6568000
	SWIR	2490	2100	1036	1035	244500	6600500
						213500	6569500

### 2.2.2 Geração de composições coloridas

A geração de composições coloridas RGB de bandas espectrais é o artifício mais comum utilizado em sensoriamento remoto devido às características próprias de nosso sistema visual na questão de percepção de cor vinculada à REM.

A capacidade do sistema visual humano em discernir tonalidades de cinza não vai além de 30 diferentes níveis. Quando se trata, porém, de cores, esse número pula facilmente para algumas dezenas de milhares de cores diferentes (com um máximo supostamente em torno de sete milhões). Pode-se, portanto, dizer que a cor domina o sistema visual humano. (Crósta, 1992)

A interpretação das composições RGB é feita com base no princípio de formação das cores pelo processo aditivo (Fig 5a). Sabendo-se a qual das cores primárias uma banda está associada, podemos obter informações qualitativas e quantitativas de sua interferência em determinadas áreas através da presença ou ausência da cor componente associada e sua intensidade.

A maior sensibilidade dos olhos a alguns comprimentos de onda (fig. 5b) faz com que a geração de composições coloridas seja um processo de tentativa e erro onde cada operador testa diversas possibilidades para que a informação desejada seja salientada. Não há uma fórmula comum a todos. As composições utilizadas para efeitos de ilustração representam as áreas de interesse preferencialmente em tons de azul e vermelho (magenta).

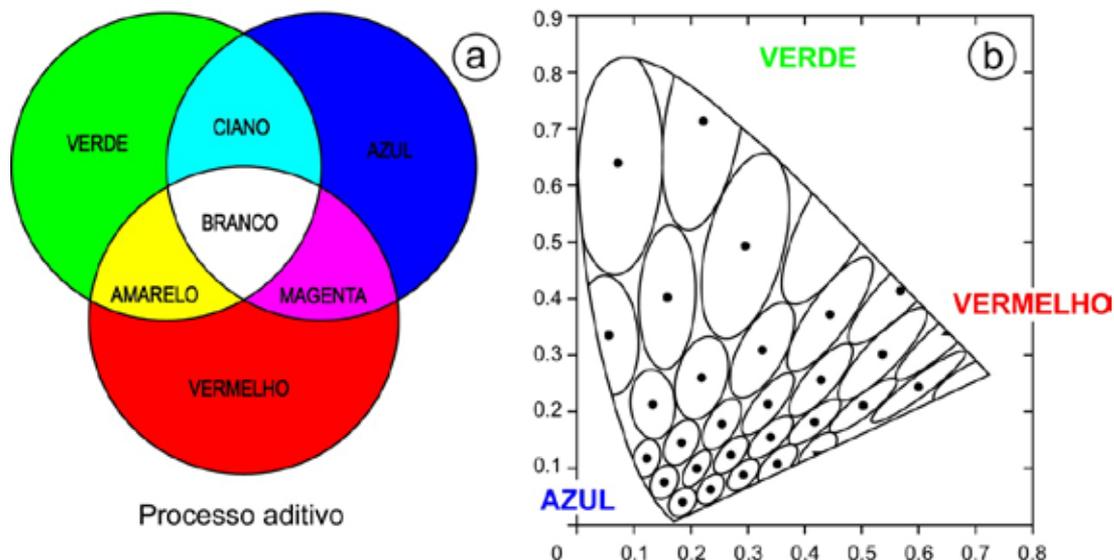


Figura 5: (a) processo de formação das cores e (b) sensibilidade visual. As elipses representam áreas de "mesma cor" para o olho humano (modificado de Crósta, 1992).

### 2.2.3 Classificação

A classificação de imagens é um recurso utilizado para diferenciação automática de feições espectrais permitindo uma abordagem igualitária em toda a extensão da(s) imagem(s) ao eliminar o fator de tendenciamento inserido pela interpretação por análise visual. Gera uma imagem simplificada através da instituição de classes representativas de determinados comportamentos espectrais de alvos selecionados a partir da escolha de *pixels* em áreas que representem esses comportamentos. Através de modelamentos matemáticos, os padrões de reflectância dessas áreas (ROI's - *Regions of interest*), são identificados em toda extensão da imagem ajustando-os e distribuindo-os por seus atribuídos em cada uma das classes estabelecidas. Foram testados os modelos de classificações padrão disponíveis no software ENVI nas cenas ASTER e TM sendo que o melhor resultado foi obtido na cena TM através da técnica de classificação supervisionada por distância de Mahalanobis.

### 2.2.4 Operações aritméticas

Foram realizadas operações aritméticas a fim de realçar picos de reflectância dos alvos com base nas supostas composições mineralógicas esperadas. Através da observação da resposta espectral de minerais e rochas pode-se inferir o comportamento característico dos alvos nas diferentes bandas espectrais. A variação na intensidade da reflectância entre materiais similares é pequena, assim se fez necessário a utilização de uma ferramenta que permitisse maximizá-las. Estas operações podem ser realizadas entre bandas, neste caso o *pixel* da imagem A [ $P_A(x,y)$ ] aplica determinada operação (adição, subtração, multiplicação ou divisão) ao *pixel* da imagem B [ $P_B(x,y)$ ] gerando uma imagem resultante C onde os valores dos *pixels* são reamostrados para o intervalo de 0-255 níveis, ou ainda utilizando-se uma ou mais bandas em uma fórmula matemática cuja configuração é exemplificada abaixo:

$$\begin{array}{l} \text{a) } \left( \frac{B4-B3}{B4+B3} \right) \implies (\text{float}(b4)-\text{float}(b3))/(\text{float}(b4)+\text{float}(b3)) \\ \text{b) } \left( \frac{B5}{B7} \right) \implies (\text{float}(b5))/(\text{float}(b7)) \end{array}$$

Figura 6: Equações típicas para imagens TM na linguagem do software ENVI.

a) NDVI - Normalized Difference Vegetation Index e b) razão índice para argilominerais.

### 2.2.5 Filtragem espectral

O modelo metalogenético admitido para a região prevê que as zonas mineralizadas ocorram associadas a zonas de deformação rúptil, onde as estruturas servem como condutos preferenciais para fluídos tornando essas áreas mais suscetíveis a alteração. A fim de refinar a seleção dos alvos a serem verificados em campo, procurou-se identificar nas imagens lineamentos próximos às áreas pré-selecionadas. Para isso, foram utilizados filtros de convolução direcionais para ressaltar estruturas lineares.

Estes filtros baseiam-se na realização de uma combinação dos pixels pertencentes a uma vizinhança do pixel a ser processado com uma matriz bidimensional (máscara) móvel que recalcula o valor de cada pixel de acordo com os pixels vizinhos multiplicando-os pelo valor inserido na máscara (ENVI, 2000). No caso de filtros direcionais essa matriz móvel é configurada de forma a ressaltar uma determinada direção ao inserir valores que gerem incremento no valor do pixel central em caso de este ser parte de uma estrutura de mesma direção que a matriz. Foram utilizadas variações 5x5 do filtro de sobel (Fig. 7). Essa técnica é chamada Convolução.

N-S	NE-SW	E-W	NW-SE		
1	2	1	-2	-1	0
0	0	0	-1	0	1
-1	-2	-1	-2	-1	0

Figura 7: Filtros direcionais de Sobel.

### 2.2.6 Componentes principais

As imagens mais relevantes foram geradas através da técnica da transformada de *Karhunen-Loeve*, mais comumente chamada de ACP (Análise por Componentes Principais). Esse processamento visa à diferenciação das feições espectrais comuns e não comuns ao conjunto das bandas originais através de sua distinção e reagrupamento dentro de um novo conjunto. O resultado desta função é determinado pelo grau de correlação entre as bandas originais e permite a obtenção de imagens sem correlação entre si. As bandas geradas são interpretadas através da análise da contribuição de cada uma das bandas originais para a criação das diferentes imagens componentes principais. Essa informação é fornecida em uma tabela de autovalores e autovetores quando da geração das imagens componentes principais e serve para a identificação das contribuições de cada uma das bandas do conjunto original em cada nova imagem gerada. Para a geração das componentes principais da cena TM foram utilizadas 6

bandas (visível, NIR e SWIR) e para a cena ASTER apenas as 6 bandas do espectro SWIR não reamostradas.

### **2.3 Compilação de dados em plataforma SIG**

A compilação de informações diversas, tais como geologia, topografia, química, etc., em um ambiente comum (Sistema de Informações Geográficas) permite uma visualização mais abrangente dos dados disponíveis contribuindo na resolução dos problemas abordados. É deveras importante no estudo de áreas extensas pelo fato de que as informações mais detalhadas (de mapeamento, por exemplo), que são obtidas em levantamentos de detalhe e que, por isso, abrangem áreas pequenas, podem ser compiladas, observadas e analisadas de forma simultânea. Essas plataformas permitem que bancos de dados com informações detalhadas sejam compilados lado a lado como uma “colcha de retalhos”, ou mesmo sobrepostos gerando assim bases detalhadas para trabalhos em áreas extensas, o que de outra forma seria difícil.

O programa utilizado para esta compilação foi o ArcGIS v9.1, sendo os dados principais:

- Geologia da área na folha de Cachoeira do Sul na escala 1:250.000
- Ocorrências na área na carta metalogenética de Cachoeira do Sul com estruturas e ocorrências (1:250.000)
- Mapa geológico de detalhe (modificado de Gastal, 2006a)
- Localização de minas e prospectos na região obtidas no GEOBANK *online* da CPRM
- Lineamentos obtidos por fotointerpretação
- Imagens de satélite utilizadas na definição dos pontos amostrados no trabalho de campo.
- Topografia (digitalizada a partir de base cartográfica na escala 1:50.000)
- Drenagem (digitalizada a partir de base cartográfica na escala 1:50.000)

- Malha rodoviária (digitalizada a partir de base cartográfica na escala 1:50.000 e atualizada sobre uma composição colorida ASTER VNIR)
- Modelo digital de elevação do terreno (gerado a partir dos dados de topografia)

## **2.4 Fotointerpretação estrutural**

As mineralizações conhecidas na região são predominantemente do tipo filonéas e estão associadas a falhas e fraturas de direção N40°E a E-W (Bongiolo, 2006). Desta forma, visando refinar os critérios de seleção para reduzir o número de áreas selecionadas para a verificação em campo com base nas maiores potencialidades, foi efetuada uma fotointerpretação para identificação de estruturas tectônicas próximas às áreas pré-selecionadas e confirmar lineamentos identificados nas imagens filtradas, uma vez que os filtros podem gerar artefatos, estruturas que não correspondem à realidade.

A fotointerpretação foi realizada com o auxílio de um estereoscópio de mesa em fotos aéreas nas escalas 1:60.000 (Fig. 8) e 1:110.000 do acervo do IG/UFRGS.

Após a definição preliminar dos alvos buscou-se a identificação de lineamentos próximos às áreas selecionadas através do reconhecimento das macro e micro-formas do relevo e padrões de drenagem. As fotos e os lineamentos assinalados na fotointerpretação foram digitalizados no *software Corel PHOTOPAINT v.13*, vetorizados e georrefenciados no SIG do projeto.

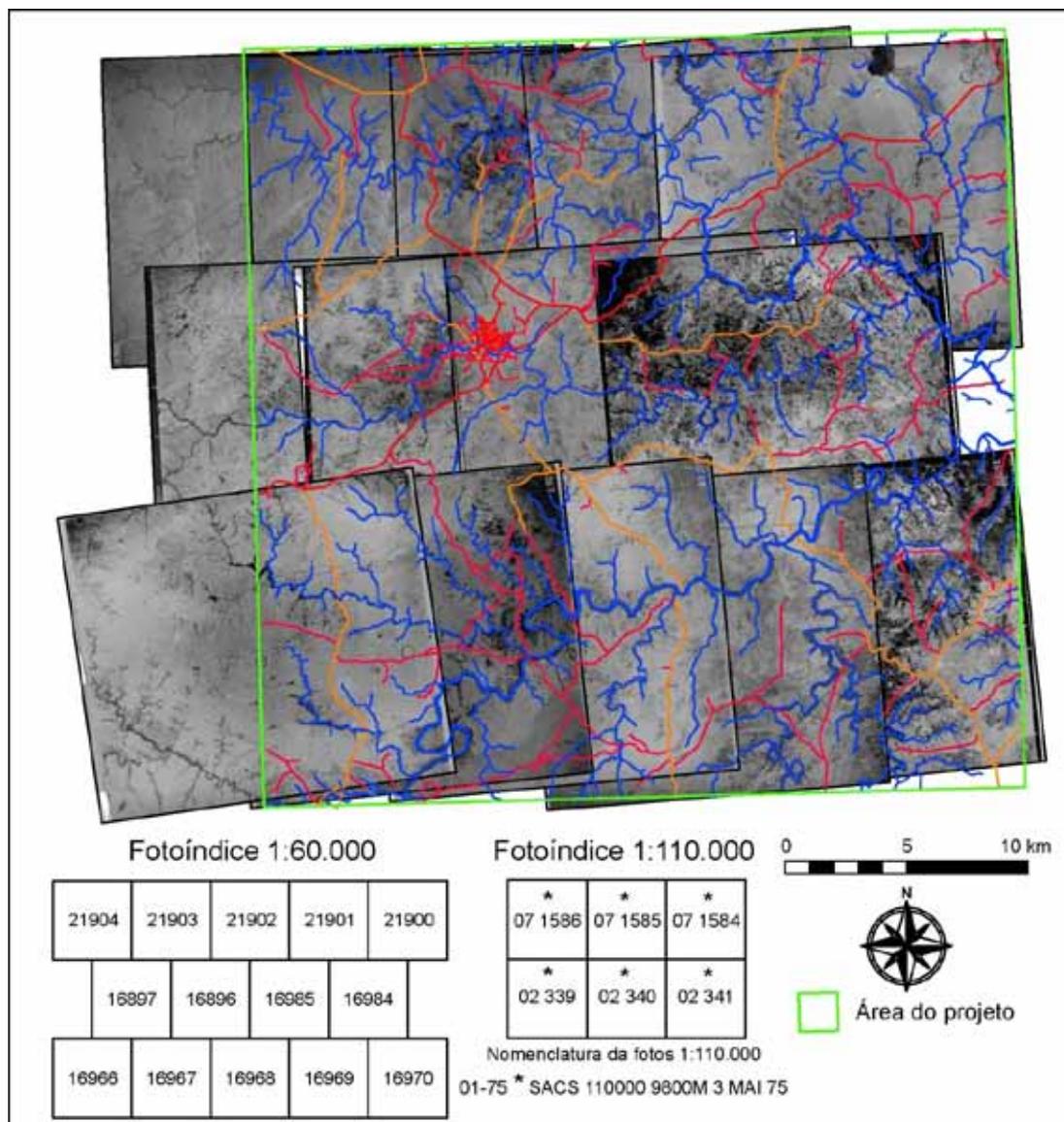


Figura 8: Fotomosaico das fotos na escala 1:60.000 com sobreposição da base cartográfica assinalando a área do mestrado e fotoíndice geral para as fotos 1:60.000 e 1:110.000.

## 2.5 Trabalho de campo

A etapa de campo foi realizada no período 20/04/2009 a 29/04/2009. Durante este período foram visitadas 21 áreas dentre aquelas previamente selecionadas para verificação das rochas, descrição dos litotipos presentes (mineralogia, grau de alteração dos afloramentos e estruturas), coleta de amostras de rocha e descrição dos afloramentos visando identificar também outros fatores, tais como o grau de exposição dos afloramentos, solo (tipo e

grau de umidade), presença e tipo de vegetação, que pudessem influenciar ou ser responsáveis pelos padrões de reflectância observados.

Em campo, os deslocamentos foram efetuados com o auxílio de camioneta e motorista cedidos pelo Instituto de Geociências. A localização foi obtida com auxílio de um GPS de mão GARMIN modelo 76, mapas topográfico e geológico, imagens de satélite e fotos-aéreas. Foi utilizada uma bússola modelo Clark na tomada de atitudes das estruturas e uma câmera Sony modelo DSC W-110 na documentação fotográfica.

## 2.6 Espectrorradiometria

Parte das amostras coletadas foi submetida à espectrorradiometria para obtenção das curvas espectrais características. O experimento foi conduzido no Laboratório de Radiometria do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LARAD/INPE). Foi utilizado um espectrorradiômetro portátil, o *FieldSpec PRO*, que opera na faixa de 350 a 2.500 nm do espectro eletromagnético. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada halógena de 600 watts de espectro contínuo (Fig. 9).

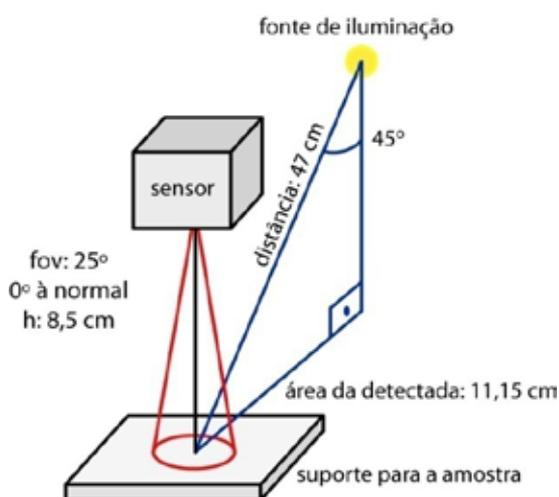


Figura 9: Geometria de aquisição dos dados de espectrorradiometria.

Foram realizadas três medidas para cada amostra e, a fim de calcular o fator de reflectância dos alvos, a cada trinta medidas em amostras mediu-

se a radiância de uma placa de referência. Para tal finalidade foi utilizada a placa *Spectralon* que apresenta reflectância próxima a 100% nas faixas espectrais do visível e infravermelho próximo.

## 2.7 Petrografia e MEV

As descrições macroscópicas de campo das amostras foram reavaliadas em laboratório afim na seleção as amostras para a laminação para descrição microscópica. A análise microscópica das lâminas delgadas visou a caracterização das fases minerais e suas texturas visando compreender a relações entre a geração das fases primárias e interação com eventos hidrotermais posteriores.

Para a confecção das lâminas as amostras vindas do campo, quando necessário, são cortadas no tamanho aproximado de um punho fechado para facilitar o manuseio. A seguir, é feito um pequeno bloco em formato de paralelepípedo, denominado “esquírola”, onde é colado o vidro que servirá como suporte. A esquírola de rocha colada ao vidro é então desgastada até a espessura padrão de 0,3 micras. Selecionou-se uma amostra para identificação química das fases metálicas. Os minerais opacos foram preliminarmente analisados pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) - tipo JEOL, JSM 5800, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A petrografia pode ser resumida em: quantificação modal através da análise de campos; identificação da mineralogia primária e de alteração quando possível; investigação das principais modificações da mineralogia primária por processos hidrotermais e/ou tardi-magmáticos; definição das paragêneses hidrotermais para investigar uma possível relação entre o tipo de alteração e a resposta espectral; e por fim a definição também da percentagem de minerais opacos nas lâminas.

Durante a coleta das amostras em campo foi realizada uma descrição macroscópica com auxílio de lupa de mão. Em laboratório, procedeu-se a uma descrição macro mais detalhada com o auxílio de lupa binocular da marca Jena Citoval. Os resultados destas descrições permitiram a escolha das amostras destinadas à laminação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Sensoriamento Remoto

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto é um processo indutivo, no qual resultados e metodologia podem ser revistos a cada nova informação agregada, ou seja, o processo que gera o dado final não é linear. Os resultados obtidos a cada processamento servem para reavaliação das informações obtidas nas etapas anteriores e como base para a utilização de novos processamentos. Desta forma, as etapas aqui listadas não seguem uma rotina linear de processamento, já que mesmo os resultados preliminares foram reinterpretados à luz das informações finais.

A seleção preliminar dos alvos foi realizada em uma composição RGB 741 da imagem TM, com as bandas 7 e 1 realçadas através da manipulação do histograma de distribuição estatística dos DN's (Fig. 10) onde se pode observar o expressivo grau de exposição do solo (tons de magenta) e reduzida interferência da vegetação (em verde) à época. As áreas de interesse aparecem em tons mais acentuados de magenta indicando maior contribuição da banda 7, no azul. A ocorrência de áreas de cor semelhante às áreas de interesse com padrões geométricos e limites retilíneos (áreas de plantio) sugere que as áreas com essa resposta encontravam-se expostas por conta de atividades antrópicas. Durante o trabalho de campo pôde-se averiguar este aspecto confirmando a ocorrência, em alguns pontos, de áreas já prospectadas onde se encontram em abundância pequenas escavações antigas, já parcial ou totalmente recobertas pela vegetação, além de rejeitos espalhados por grandes extensões o que justifica a alta resposta espectral observada nas bandas que captam preferencialmente solo e rocha, uma vez que apenas em um dos locais visitados verificou-se a ocorrência de um afloramento contínuo de rocha espacialmente condizente com as dimensões da anomalia espectral assinalada na imagem (HL-40).

Com o objetivo de realizar uma seleção baseada no padrão espectral da área do Bloco do Buitá efetuou-se uma classificação digital da cena TM.

O modelo de classificação que melhor discriminou as áreas de interesse foi o modelo de classificação supervisionada pelo método da distância de Mahalanobis (Fig. 11-l).

As classificações mais detalhadas, procurando diferenciar tipos de solo e vegetação, geraram imagens complexas de difícil interpretação; deste modo se optou por uma classificação simples com três grandes classes gerais com uma grande amplitude de reflectância e uma classe com a amplitude mais restrita (menor variação no valor médio nos DNs dos pixels) representando as áreas de interesse (Tab. 2).

Tabela 2: Classes estabelecidas e número de pixels por amostra

Classes	Amostra ( <i>pixels</i> )	Cor
Solos secos	60	Amarelo
Solos úmidos (áreas de interesse)	107	Vermelho
Vegetação	147	Verde
Corpos d'água	63	Azul

Assim, a imagem gerada representa de forma simplificada a informação não desejada detalhando as áreas de interesse. Apesar da escolha cuidadosa dos pixels representativos das áreas-alvo, outras áreas reconhecidas como áreas de “terra arrasada” e algumas áreas preparadas para plantio, cujas reflectâncias se confundem em algumas bandas com as áreas-alvo, foram assinaladas nesta classe. Estas, contudo, se podem diferenciar facilmente das áreas de interesse pela morfologia (Fig. 11 - a e b) uma vez que obedecem a padrões regulares gerados por intervenção antrópica (ex: limites de propriedades).

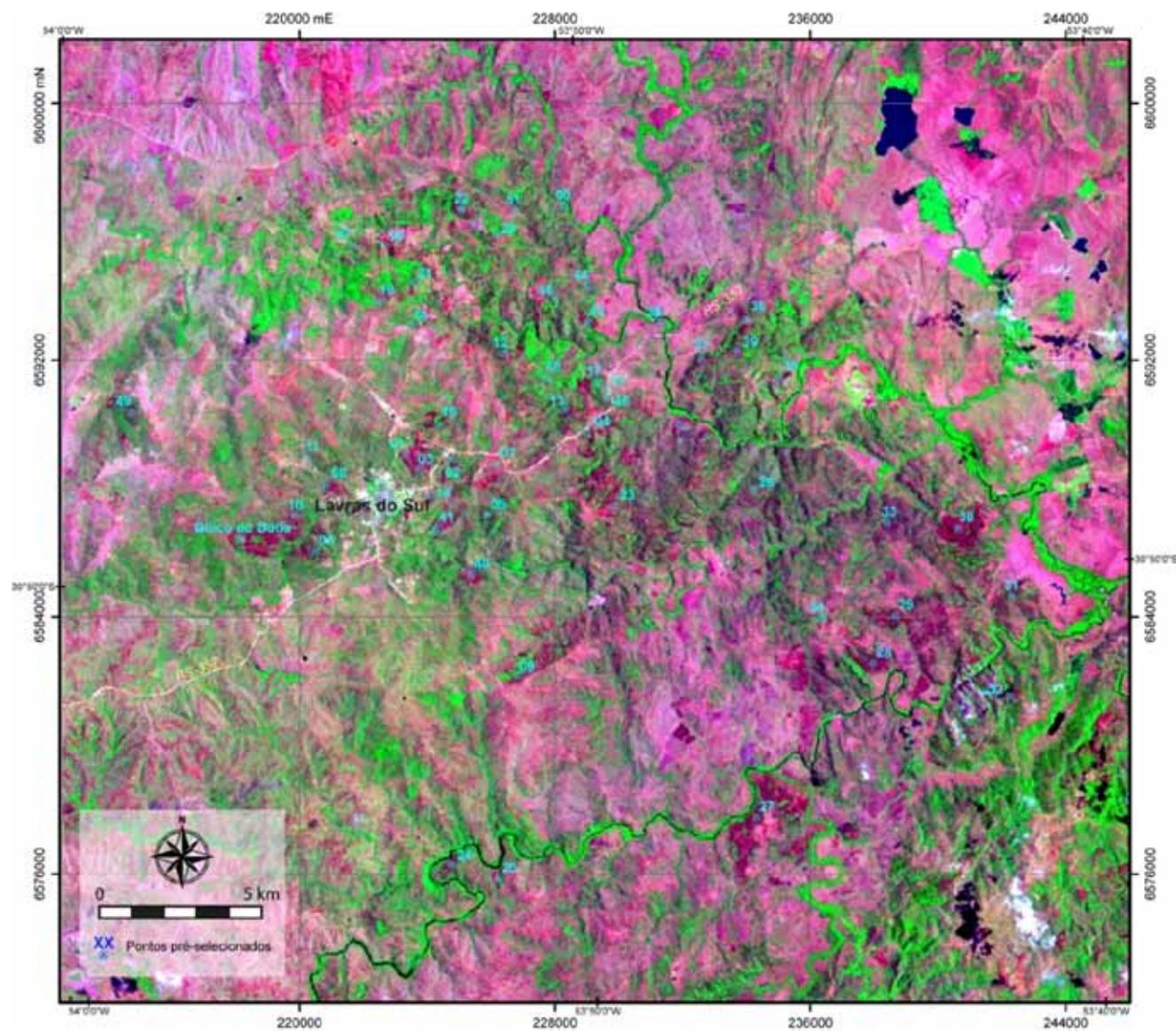


Figura 10: composição TM RGB 741 com a seleção preliminar dos pontos com resposta visual semelhante à área do Bloco do Butiá

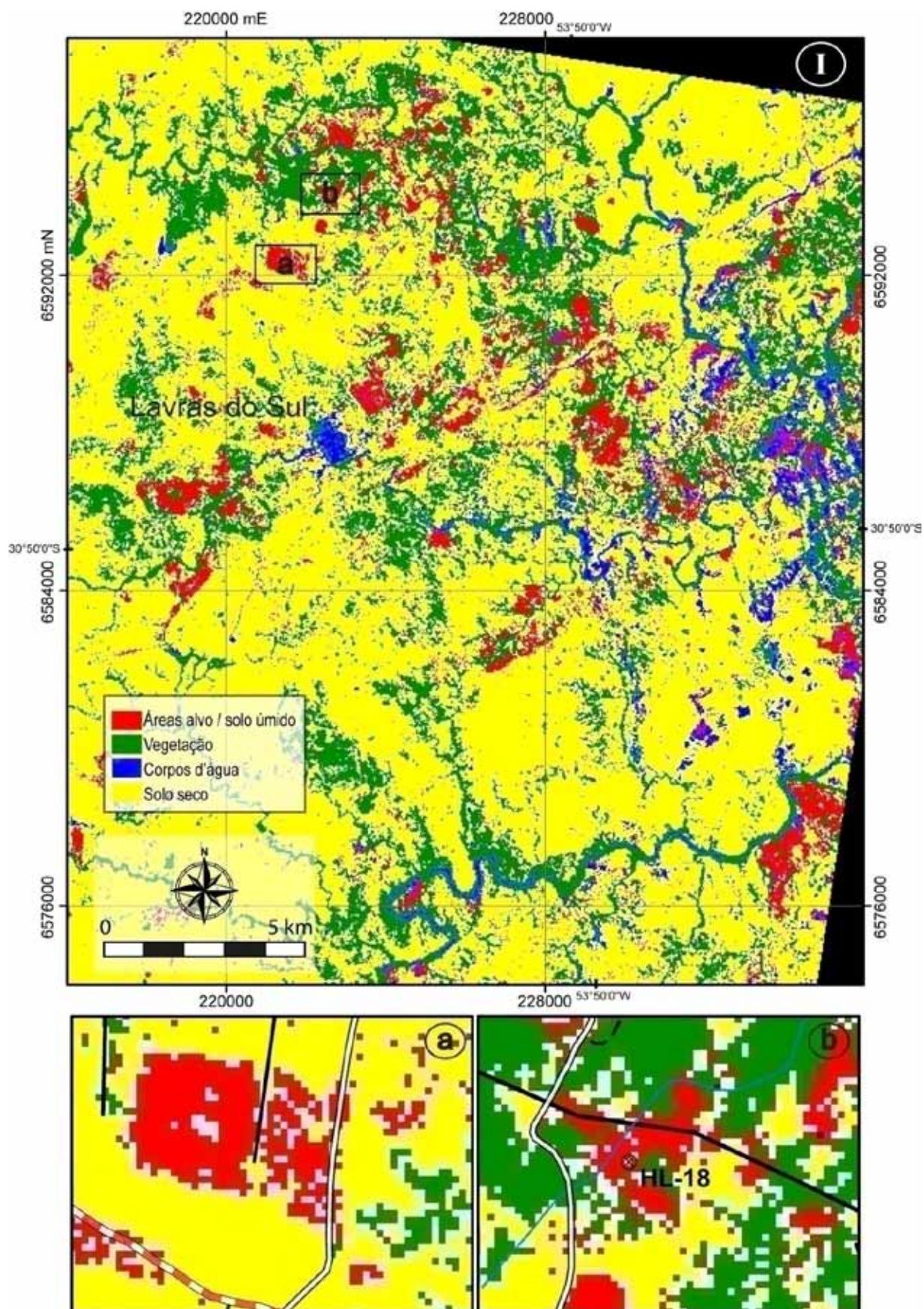


Figura 11: (I) Cena TM classificada pelo método da distância de Mahalanobis. (a) e (b) áreas de mesma classe distinguíveis pela morfologia. (a) lavoura e (b) área alvo próxima a lineamento de escala regional.

Operações aritméticas entre bandas foram realizadas afim de verificar a resposta da cena para índices reconhecidos na bibliografia, como óxidos de ferro (TM3-TM1) e argilominerais (TM5/TM7) (Crósta, 1992) dentre outros aleatórios, com posterior fatiamento por densidade dos DNs da imagem resultante, contudo, o elevado grau de exposição que proporciona maior acesso às informações de solo é, neste caso, uma variável negativa uma vez que as respostas obtidas por estes processamentos tornaram-se demasiado gerais não permitindo a observação de concentrações anômalas e dificultando assim a interpretação. Para resultados mais específicos recorreu-se ao processamento de análise por componentes principais.

A geração de imagens componentes principais das cenas TM e ASTER visou a uma melhor delimitação das áreas alvo na cena TM e a estabelecer uma correlação com a cena ASTER, de melhor resolução espectral. Os resultados obtidos para a cena TM permitiram o refinamento da escolha dos locais a serem vistoriados não fornecendo, contudo informações que permitissem a análise conjunta da cena ASTER. Assim, são apresentados a seguir os resultados obtidos para a cena TM (os dados da cena ASTER podem ser encontrados na mídia em anexo e não serão mais citados aqui).

Foram utilizadas as seis bandas do VNIR e SWIR (TMs 1, 2, 3, 4, 5 e 7) para a geração das CPs. Os resultados são apresentados abaixo (tabelas 3, 4, 5 e 6).

Tabela 3: Análise da dimensionalidade dos DNs da cena.

Dimensionalidade dos DNs				
Banda	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
1	69	255	99.532082	7.568792
2	25	197	43.002193	4.940553
3	2	247	50.568415	10.171068
4	7	202	73.453444	9.411737
5	0	255	137.597499	32.188147
7	0	243	58.707242	17.961615

Tabela 4: Análise da distribuição da informação nas CPs resultantes.

CP	Autovalores	(%)
1	1480.990199	90.72
2	95.408717	5.84
3	40.176980	2.46
4	11.444048	0.70
5	3.598887	0.22
6	0.804655	0.05

Tabela 5: Análise da correlação (covariância normalizada) entre as bandas do conjunto original.

Matriz de correlação						
Bandas TM	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
1	1	0.955	0.931	0.003	0.796	0.817
2	0.955	1	0.949	0.090	0.824	0.823
3	0.931	0.949	1	-0.094	0.889	0.916
4	0.003	0.090	-0.094	1	-0.011	-0.156
5	0.796	0.824	0.889	-0.011	1	0.959
7	0.817	0.823	0.916	-0.156	0.959	1

Tabela 6: Análise da contribuição relativa de cada banda às PCs.

Autovalores						
CP	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
1	0.164	0.110	0.244	-0.012	0.832	0.457
2	0.016	0.057	-0.073	0.956	0.152	-0.233
3	0.612	0.366	0.569	0.096	-0.386	0.096
4	0.220	0.137	0.112	-0.268	0.366	-0.845
5	0.701	-0.076	-0.700	-0.040	0.022	0.100
6	0.241	-0.909	0.329	0.060	0.008	-0.056

Os alvos representam áreas anômalas não correlacionáveis em todo o conjunto, desta forma é possível uma seleção prévia das CPs que de fato conterão a informação desejada. A análise dos autovalores (Tab. 4) permite a visualização da quantidade de informação correlacionável (90,7%) que é agrupada na CP1. Essa é a informação que é comum a todo o espectro e representa principalmente os aspectos morfológicos marcados por iluminação e sombreamento do terreno. Contudo a característica principal desta cena, o elevado grau de exposição dos solos, é aqui ressaltada pela

alta contribuição e correlação entre as bandas TM5 e TM7 (Tab. 5) com as bandas do visível TM1, TM2 e TM3 e baixa correlação com a banda TM4, infravermelho próximo que responde às altas reflectâncias da vegetação.

Analisando-se a tabela de autovalores percebe-se que a CP2, primeira feição espectral, não correlacionável, contém 5,84% da informação e representa a vegetação – elevado autovalor positivo na banda 4 (infravermelho próximo) confirmando a hipótese de que em parte das áreas assinaladas a vegetação foi completamente removida (Fig. 12).

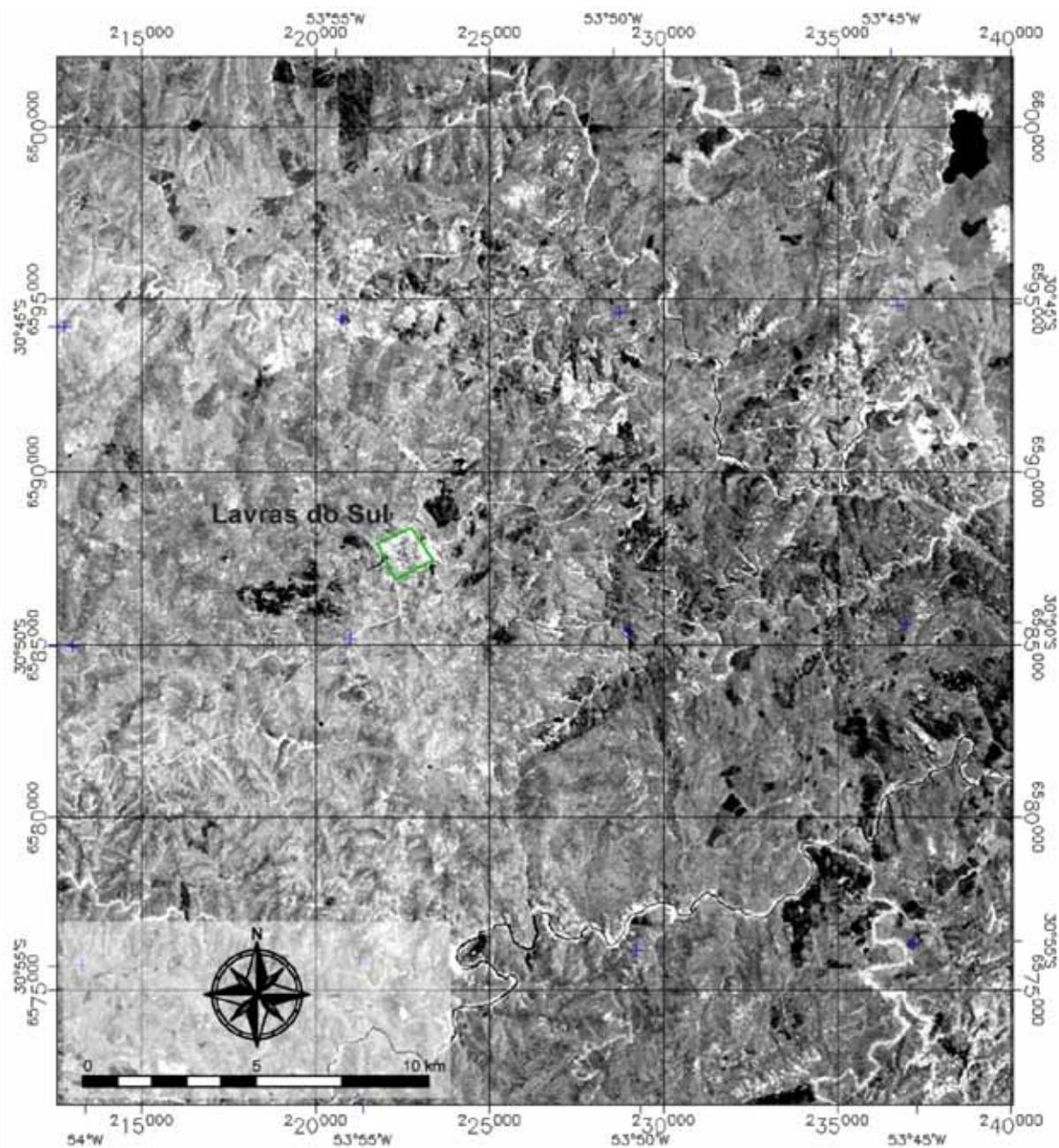


Figura 12: Imagem CP2 com valores altos de DN para vegetação.

A CP3 é resultado da contribuição semelhante das três bandas do visível (Tab. 5) e relação inversa com a TM5. Apresenta altos valores de DN para rochas e solos de caráter mais férricos e compactados, podendo servir de guia para localização de afloramentos.

A CP4 apresenta um resultado semelhante ao que foi pretendido com a operação entre as bandas TM5 e TM7, contudo, naquele caso, a distribuição normal dos DN nas imagens originais (Tab. 2) não permitiu a

geração de uma imagem com informações relevantes. Nesta CP, a contribuição positiva da TM5 e negativa da TM7 representa aproximadamente o inverso do índice de argilominerais (razão TM5/TM7) sem a informação comum ao conjunto.

Na CP5, a contribuição inversamente proporcional entre das bandas TM1 e TM3 pode ser interpretada como um índice para óxidos de ferro. A CP6, que contém o ruído restante, é influenciada principalmente pelas bandas do visível.

Foram geradas diversas imagens coloridas RGB para análise sendo que uma das composições que melhor caracterizou as áreas alvos foi gerada com a CPs 5, 4 e 1 (Fig. 13). Pelos critérios descritos anteriormente estas áreas aparecem em tons de vermelho e magenta.

A seleção dos alvos foi revista a partir da constatação da ocorrência de lineamentos em áreas próximas às áreas alvo através de um mapa de lineamentos construído com dados obtidos por fotointerpretação nas escalas de 1:60.000 e 1:110.000 (Fig. 14) e interpretação de um conjunto de imagens filtradas. A imagem utilizada para filtragem espectral foi a CP1 dada a sua características de conter a informação morfológica do conjunto das bandas. A fim de aproveitar as informações já contidas no mapa geológico básico utilizado, procurou-se não duplicar os lineamentos de maior expressão de forma que na escala de 1:110.000 foram poucas as feições assinaladas. A ocorrência de intenso fraturamento no limite norte do CILS, evidenciado por padrões de drenagem angulares com macroformas de relevo cupuliformes grosseiras limitou a demarcação dos lineamentos de pequena escala a fim de preservar o aspecto visual. Assim, foram demarcados apenas alguns dos lineamentos representativos das zonas intensamente fraturadas sendo necessária a observação alternada do fotomosaico a fim de reconhecer estas zonas quando da escolha dos pontos a serem vistoriados. A integração de todas as ferramentas permitiu a escolha dos 23 pontos que foram vistoriados em campo (Fig. 15).

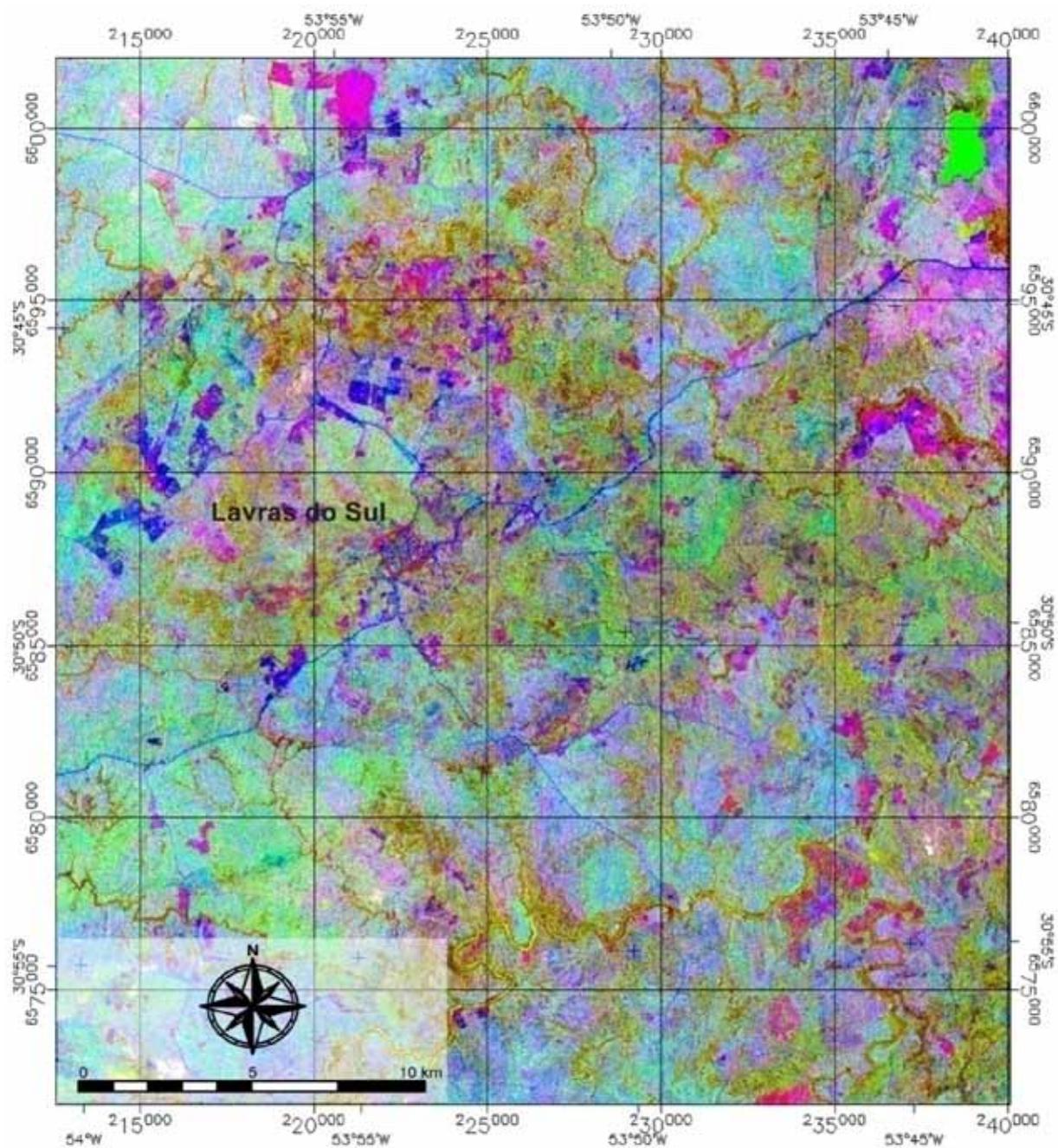


Figura 13: Composição RGB das CPs 541 com as áreas alvo em tons de vermelho e magenta.

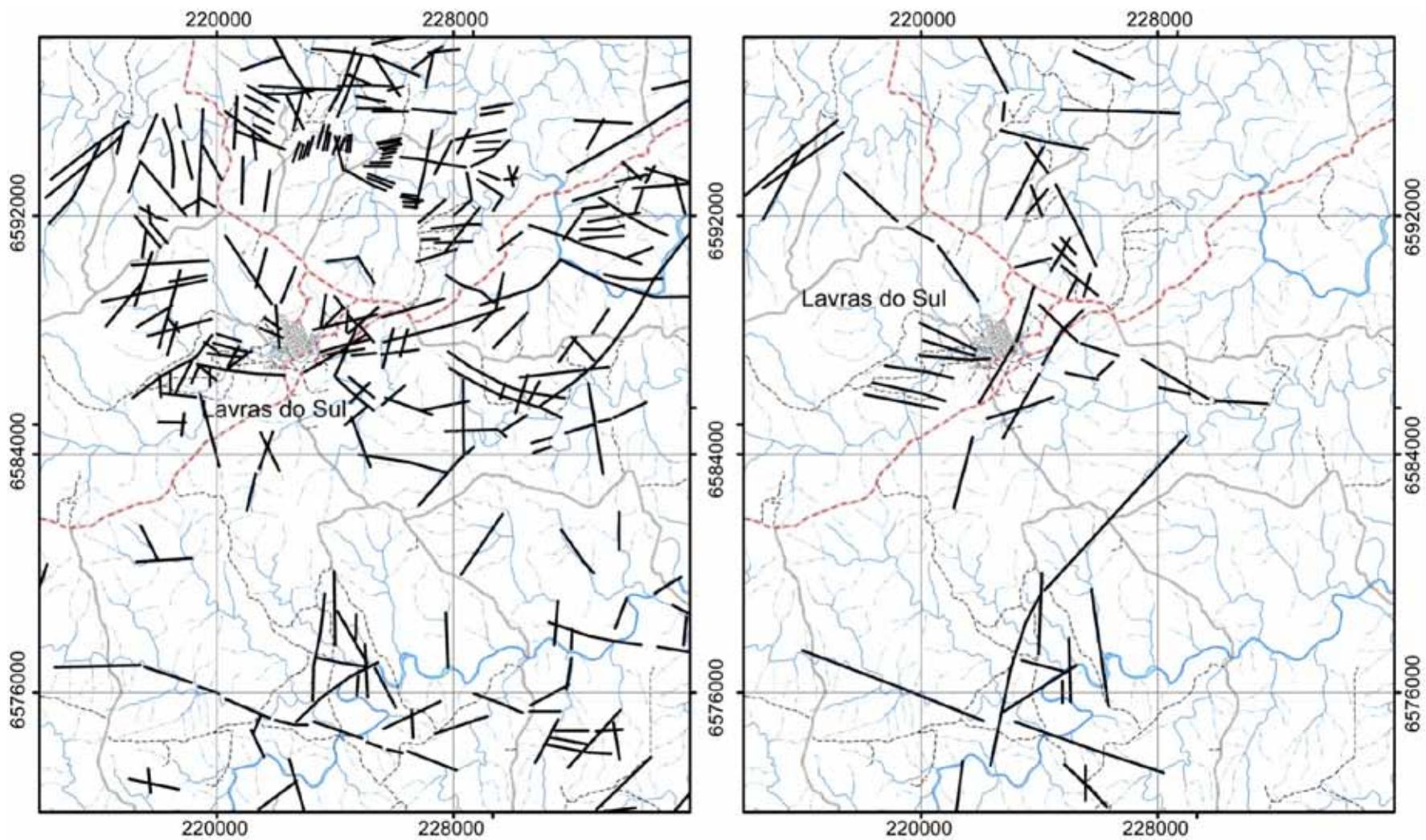


Figura 14: Lineamentos assinalados por fotointerpretação nas escalas 1:60.000 e 1:110.000.

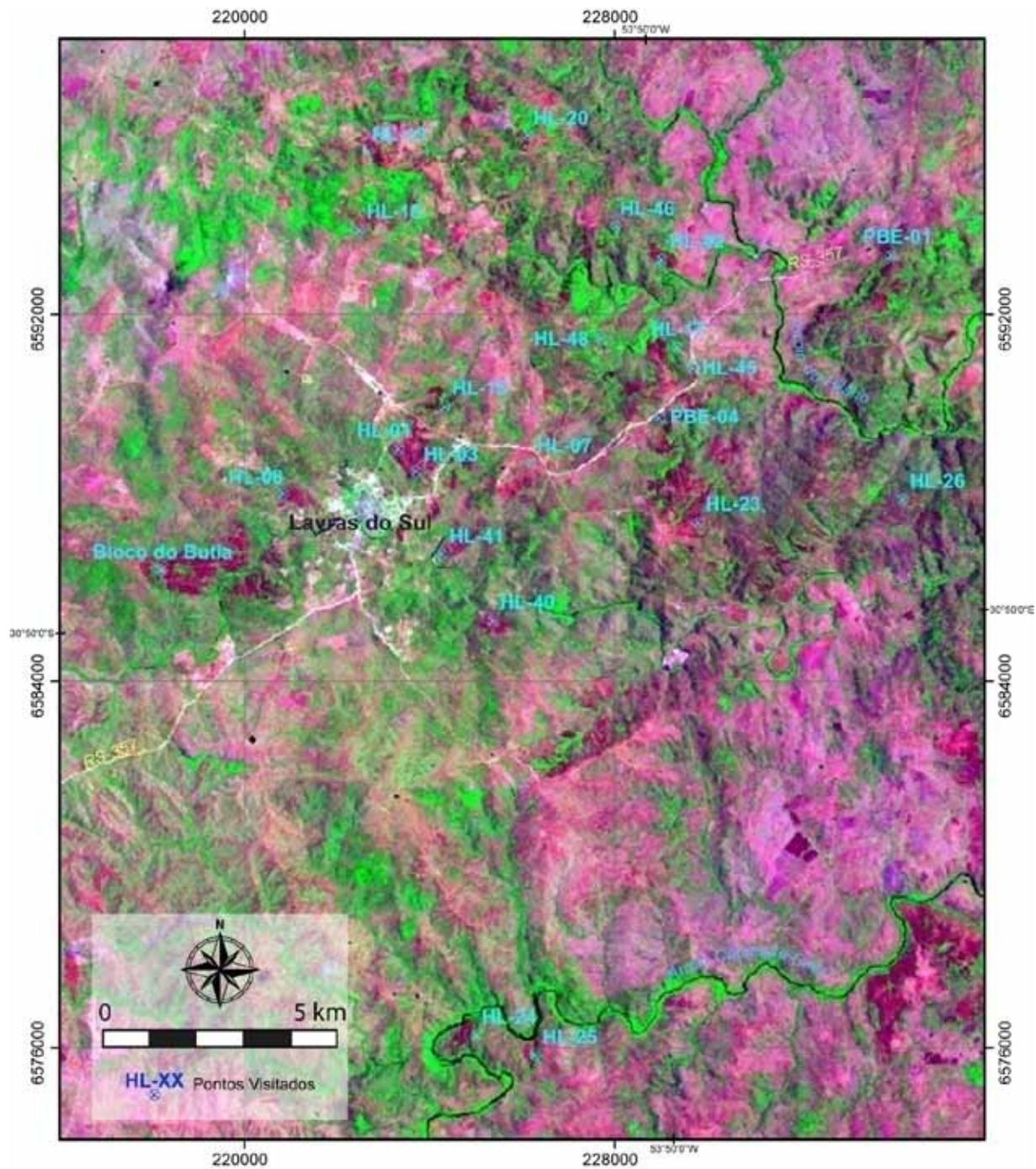


Figura 15: Pontos selecionados para vistoria em campo.

### 3.2 Trabalho de campo

A verificação em campo permitiu a constatação da ocorrência de áreas com características distintas do entorno, não necessariamente associadas a perfis de alteração. Para melhor observar os fatores que influenciaram as respostas espectrais destas áreas nas imagens foram realizados perfis nos alvos mais promissores e realizadas a descrição e a coleta de amostras. Os pontos não representam necessariamente exposição de rochas, sendo que parte foi assinalada para a menção de alguma feição específica.

As descrições apresentadas a seguir, em ordem numérica, estão acompanhadas de uma breve discussão relativa aos critérios de escolha e dos prováveis fatores condicionantes das respostas espectrais observadas.

Tabela 7: Lista dos pontos descritos.

Leste	Norte	Ponto
218180	6586313	Bloco do Butia-1
218190	6586537	Bloco do Butia-2
223320	6589053	HL-01
224792	6588907	HL-02
223708	6588572	HL-03
226203	6588767	HL-07
220918	6588061	HL-08-1
220793	6588048	HL-08-2
220807	6588145	HL-08-3
224327	6589982	HL-15
229666	6591329	HL-17-1
229431	6591305	HL-17-2
229328	6591127	HL-17-3
228974	6591298	HL-17-4
222525	6593880	HL-18-1
222486	6593846	HL-18-2
222425	6593763	HL-18-3
222750	6595670	HL-19-1
222825	6595470	HL-19-2
222440	6595528	HL-19-3
226124	6595903	HL-20

Leste	Norte	Ponto
229820	6587194	HL-23-1
229775	6587297	HL-23-2
229845	6587370	HL-23-3
229843	6587473	HL-23-4
229820	6587602	HL-23-5
229798	6587787	HL-23-6
225648	6576143	HL-24-1
225292	6576184	HL-24-2
224808	6576234	HL-24-3
224592	6576313	HL-24-4
224700	6576500	HL-24-5
226404	6575768	HL-25-1
226158	6575912	HL-25-2
234182	6588073	HL-26-1
234272	6587839	HL-26-2
225297	6585485	HL-40-1
225435	6585139	HL-40-2
224021	6586725	HL-41-1
224514	6586792	HL-41-2
228902	6593272	HL-42-1
229034	6593263	HL-42-2

Leste	Norte	Ponto
229153	6593024	HL-42-3
229664	6591328	HL-43
229785	6590889	HL-45-1
229594	6590761	HL-45-2
227929	6593918	HL-46-1
228128	6593938	HL-46-2
227740	6591541	HL-48-1
227653	6591389	HL-48-2
233770	6593640	PBE-01-1
233808	6593466	PBE-01-2
233823	6593377	PBE-01-3
233962	6593081	PBE-01-4

Leste	Norte	Ponto
233945	6592756	PBE-01-5
234096	6593051	PBE-01-6
234425	6593347	PBE-01-7
234067	6593364	PBE-01-8
233909	6593464	PBE-01-9
228810	6589744	PBE-04-1
228950	6589700	PBE-04-2
229082	6589691	PBE-04-3
229112	6589615	PBE-04-4
228897	6589888	PBE-04-5

### 3.2.1 Bloco do Butiá

A área da mina Bloco do Butiá, selecionada como área piloto, foi a área da mina Bloco do Butiá, selecionada como área piloto, foi visitada a fim de se estabelecer um parâmetro de comparação às demais áreas selecionadas. Constatou-se que:

A área da mina e uma extensa área no entorno, partindo da cidade de Lavras do Sul, até as cavas das minas antigas, cerca de 4,5 km a oeste, foi sistematicamente prospectada havendo rejeitos de mineração em todo o entorno (Fig. 16). Isso é compatível com o que se observa na imagem, uma vez que a área da mina em si não ultrapassa algumas centenas de metros quadrados. Este fato revela também que a anomalia na imagem, primeiramente admitida como produto da alteração do substrato exposto é, na verdade, um resultado combinado da ação antrópica que removeu completamente a cobertura vegetal e parte do solo que recobria as rochas, e das propriedades singulares da rocha alterada.

Os rejeitos de mineração predominantes, próximo às cavas, são pertita granitos com intensa alteração do tipo fílica, compostos de feldspato alcalino pertitzado parcialmente alterado, quartzo e mica branca que perfaz cerca de 50% da rocha alterada. Uma amostra desta rocha foi coletada e

submetida à espectrorradiometria, cujos resultados são apresentados no respectivo item deste capítulo.



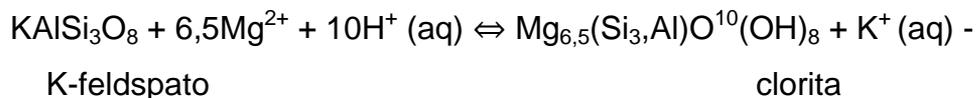
Figura 16: Montagens panorâmicas da área da mina Bloco do Butiá: a) cava principal e b) aspecto geral do terreno no entorno, com trincheiras e valas.

### 3.2.2 HL-01, 02, 03 e 07

Estas quatro áreas apresentam caractérisitas semelhantes de vegetação e tipos de afloramento. A vegetação predominante é do tipo vassoural com arbustos de pequeno porte evidenciando que as áreas já tiveram a cobertura natural removida. Os afloramentos são tipo blocos e pequenos lajeados dispersos em encostas. As rochas identificadas foram:

Nos pontos HL-01, HL-02 e HL-03: Biotita monzogranito com textura porfírica com fenocristais de plagioclásio e megacristais de feldspato alcalino (no ponto HL-01 ocorre textura rapakivi nos fenocristais) com dimensões de até 1 cm. A matriz tem textura fanerítica média e é composta por plagioclásio, feldspato alcalino (não se observa rapakivi nos feldspatos da matriz), quartzo biotita e, em menor proporção anfibólio (grupo da hornblenda).

No ponto HL-07 ocorrem apenas alguns lajeados de granitóide intensamente intemperizado onde se identifica apenas quartzo e clorita (?). Esta alteração deve envolver especialmente hidrólise com:



A assinatura observada na imagem sugere a presença significativa de argilominerais e provavelmente deve ter sido gerada por atividades de remoção/alteração do perfil de solo das áreas assinaladas. A utilização de imagens de sensores com maior resolução espectral pode eliminar esse efeito. Ao se definir um mineral ou associação mineral alvo poder-se-ia definir um espectro alvo ideal e realizar uma varredura por *endmembers*, onde o *software* seleciona apenas pixels cujo perfil corresponde àquele idealizado ou dentro dos limites de similaridade estabelecidos.

### 3.2.3 HL-08

O ponto assinalado na imagem corresponde a uma área cortada por um lineamento com direção aproximada N60W próximo a área conhecida como mina Paredão à NW da cidade de Lavras do Sul.

A área é coberta por blocos dispersos no campo, fortemente intemperizados, ocorrendo ainda trincheiras e valas próximas às áreas onde se identificam veios de quartzo nos pequenos lajeados aflorantes.

A rocha dos lajeados varia composicionalmente de granodiorito, no ponto HL-08-1, a monzogranito no ponto HL-08-2, com textura porfírica, sendo plagioclásio e feldspato alcalino, o fenocristal e megacristal. Também presentes na matriz ocorrem, a biotita e o anfibólio como máficos, sem feições de alteração aparente.

No ponto HL-08-3 ocorrem veios de quartzo (158/85) e uma apófise de rocha máfica cloritizada em zona intensamente fraturada. A causa da resposta espectral pode estar relacionada ao perfil pouco espesso de rocha intemperizada.

### 3.2.4 HL-15

Ponto situado próximo ao início de um lineamento e a uma área demarcada como área de lavra rudimentar segundo dados do *Geobank* da CPRM. Ocorrem blocos dispersos no campo e pequenos lajeados junto à drenagem. A vegetação da área consiste em vassourais e o solo apresenta-se irregular.

Monzogranito porfirítico com predominância de feldspato alcalino como megacrystal, com dimensões de até 1,2 cm. Localmente é vinculado com a textura rapakivi onde envolve o plagioclásio. Feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, anfibólio e biotita compõem também a matriz de textura fanerítica média equigranular.

A resposta espectral pode estar condicionada pelo mesmo fator do ponto anterior, uma vez que o perfil de solo é pouco espesso. A área assinalada foi identificada como nascente de um riacho, afluente do Arroio do Jacques, com áreas alagadiças e pantanosas.

### 3.2.5 HL-17, 45 e 48

Área à NE da cidade de Lavras do Sul, junto à RS-357 próximo aos lineamentos de direção EW, NE e NW. Próximo a ocorrências de *Cu* assinaladas no mapa metalogenético/previsional da CPRM (2000).

Com excessão do ponto HL-48 onde a vegetação é de porte médio, os afloramentos constituem-se de lajeados bem preservados com dimensões significativas de até aproximadamente 30 m<sup>2</sup> em meio a arbustos e vegetação. Os perfis foram realizados em áreas cuja vegetação original foi removida e o solo remexido resultando numa área coberta por pequenos blocos e alguns poucos lajeados.

Os afloramentos não têm grande continuidade de forma que não foram identificados contatos entre os litotipos descritos. As rochas identificadas no perfil são:

HL-17-1: Monzonito com megacristais de feldspato alcalino de até 5 cm e textura poiquilítica com inclusões de opacos, hornblenda e

plagioclásio, fenocristais de plagioclásio e um máfico, com hábito compatível com hornblenda cloritizado com dimensões de até 1 cm envoltos em matriz fanerítica fina a afanítica de cor vermelho-rosada.

HL-17-2: Lava andesítica intensamente brechada e intemperizada, identificável por prismas alongados de plagioclásio argilizados e remanescentes.

HL-17-3: tufo andesítico composto por cristaloclastos de plagioclásio com habito prismático alongado; litoclastos andesíticos e com sulfetos disseminados.

HL-17-4: Neste ponto ocorrem dois tipos de rocha (Fig. 17): nos lajeados menores a rocha é um monzogranito de textura porfírica com feldspato alcalino e plagioclásio como fenocristais (< 1 cm) em matriz média a fina composta de feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo e anfibólio; esta rocha não apresenta feições de alteração. Em um lajeado maior e de forma irregular (aparenta ser um dique de pouco mais de 1 m de espessura, contudo não se observam contatos ou continuidade) a rocha é um monzonito com megacristais, semelhante ao descrito no primeiro ponto do perfil, porém mais alterado. A matriz também está parcialmente cloritizada.

HL-45-1: Lava andesítica propilitizada (epidoto, clorita, carbonato com substituição de plagioclásio e biotita-hornblenda), com fenocristais de plagioclásio, matriz cloritizada e pouco sulfeto disseminado. Ocorrem fraturas preenchidas com carbonato onde ocorre deposição de sulfetos.

HL-45-2: Rocha andesítica muito brechada com elevado grau de intemperismo, semelhante ao ponto HL-17-2.

HL-48-1: Monzonito porfírico fraturado com megacristais de feldspato alcalino poiquilíticos, cristais de plagioclásio, k-feldspato e máficos cloritizados próximo a fraturas. Os afloramentos são de grandes dimensões e a rocha “sã”.

HL-48-2: Afloramentos e rocha semelhantes ao ponto anterior.



Figura 17: Ponto HL-17-4. A linha tracejada marca a provável orientação do dique. a) monzonito com megacristais de k-feldspato e b) monzogranito.

Uma característica comum entre as litologias descritas é a alteração da matriz das lavas, dos tufos e das brechas andesíticas para um material de granulação fina de cor verde a verde-escura identificado em lâmina delgada como clorita. A amostra coletada no ponto HL-17-3 foi submetida à laminação e confirmou-se ainda a presença de epidoto e carbonato como minerais de alteração tanto nos máficos da matriz quanto nos cristais de plagioclásio. A curva espectral obtida para a amostra corrobora esta idéia apresentando feições de absorção características dos minerais citados.

### 3.2.6 HL-18

A área assinalada encontra-se no limite norte do pertita granito próximo a um lineamento de direção N70W de expressão regional e lineamentos menores, de direção N10-30E. Observando-se o modelo digital de elevação do terreno pode-se inferir uma zona de influência deste lineamento principal de cerca de 500 m onde ocorrem diversos lineamentos de menor expressão com direções NW mais ou menos paralelos.

HL-18-1: Quartzo leitoso e nódulos de hematita espalhados por sobre uma elevação que culmina com um pequeno afloramento de rocha alterada.

O protólito possivelmente é uma rocha de composição monzo a sienogranítica de textura equigranular grossa. A rocha é constituída de uma massa de argilas, óxidos de ferro e quartzo leitoso.

HL-18-2: Blocos de sienogranito de textura grossa, composto feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e anfibólio aflorando ao longo de um alinhamento aproximadamente NS.

HL-18-3: Grande afloramento de monzogranito de textura média a grossa com alguns cristais de plagioclásio e k-feldspato (localmente com textura rapakivi) pouco maiores, quartzo e anfibólio. A rocha encontra-se pouco fraturada e não apresenta feições de alteração estando, inclusive a fase máfica, bem preservada.

Este ponto representa a um alvo modelo segundo os critérios gerais utilizados para a seleção dos alvos (Fig. 18). Manteve-se realçado na maior parte dos processamentos aplicados; Encontra-se uma área cortada por lineamentos; O padrão geométrico da anomalia segue as direções dos prováveis lineamentos e não foram identificados sinais de alteração significativa no ambiente. As amostras deste ponto submetidas à espectrorradiometria mostraram curvas com características espectrais de absorção típica para micas, semelhante à amostra coletada no Bloco do Butiá.



Figura 18: a) afloramento no ponto HL-18-1; b) detalhe do veio de quartzo; c) granito filitizado com quartzo hidrotermal e óxidos de ferro; d) aspecto geral da área no entorno com quartzo leitoso e nódulos de hematita espalhados; e) ponto HL-18-2 e f) ponto HL-18-3.

### 3.2.7 HL-19 e 20

As áreas foram assinaladas de acordo com critérios de resposta espectral e geoestrutural. As rochas identificadas são:

HL-19-1, 2 e 3: A rocha identificada nos três pontos assinalados é um

Biotita-hornblenda monzonito de textura equigranular média. O mineral mais alterado é o plagioclásio (mica branca) que se encontra em mais avançado grau de alteração. A biotita aparece como constituinte primário em espaços intergrãos e, aparentemente como produto da alteração do anfibólio em lamelas sobre estes minerais.

HL-20: não ocorrem grandes afloramentos neste ponto estando a amostragem restrita a um pequeno lajeado e a blocos soltos no campo. A rocha é um Hornblenda-quartzo monzonito de textura média a grossa com incipiente alteração no anfibólio.

Em campo não se observaram fatores relevantes para as respostas espectrais obtidas nas imagens, contudo, a atual cobertura vegetal na área do ponto HL-19 é bastante densa e o solo irregular, indicando a possível atividade antrópica na derrubada da vegetação original e alteração do perfil de solo. Para uma melhor compreensão, a amostra do ponto 19 foi submetida à espectrorradiometria e a amostra do ponto 20 foi laminada.

### **3.2.8 HL-23**

Em área próxima à mina denominada Cerro Rico, com lineamentos N40E, observa-se a presença de trincheiras e rejeito de mineração dispersos pelo campo. A mineralização nesta área é do tipo filoneana associada a veios de quartzo e hematita.

As rochas se repetem ao longo do perfil variando o grau de alteração, principalmente da matriz, e, localmente a presença de veios de quartzo e hematita. A rocha é uma lava andesítica caracterizada pelos fenocristais de plagioclásio de cor avermelhada imersos em matriz microcristalina de cor escura que aparece mais ou menos alterada ao longo do perfil. Ocorre também, um máfico de hábito tabular geralmente alterado à clorita. Podem ainda ser observadas em amostra de mão vesículas estiradas preenchidas por carbonato e clorita.

No ponto HL-23-3 ocorre um veio de quartzo com hematita e carbonato associado a uma rocha de aspecto lamprofírico com matriz

alterada e fenocristais de clorita/epidoto como pseudomorfos de um máfico de hábito tabular.

A característica comum a todo o perfil, observada nas amostras, é a alteração da matriz e dos máficos, em maior ou menor grau, e o preenchimento das vesículas com carbonato e clorita.

### 3.2.9 HL-24 e 25

No ponto HL-25 assinalado observa-se à presença de um grande lineamento NNW e não apresentou afloramentos ou feições distintivas. No ponto HL-25-1 ocorre uma vala escavada no campo que chega a ter cerca de 2 m de profundidade e 1 m de largura. No ponto HL-25-2 ocorre um campo alagadiço que possivelmente gerou a anomalia assinalada.

A ocorrência de lineamentos de direção NNW na área do ponto HL-24 foi confirmada em campo através da identificação de brechas hidráulicas de arenito e quartzo e da ocorrência subordinada de diques de lamprófiros.

HL-24-1: Brecha hidráulica ao longo do lineamento assinalado na imagem, composta por uma rocha de composição lamprofírica com matriz a base de clorita/epidoto, plagioclásio e fenocristais de anfibólio. A encaixante é um arenito arcoseano fortemente silicificado e o alinhamento do veio é 233/58. Os veios ocorrem alongados segundo N-S em uma faixa de aproximadamente 50 m e têm até 30 cm de espessura.

HL-24-2: Brecha semelhante à do ponto anterior, mas com dimensões reduzidas. Ocorre apenas um veio com até 20 cm de espessura.

HL-24-3: Lineamento assinalado na imagem – brecha hidráulica de arenito com quartzo. O arenito tem coloração cinza escura, grãos de tamanho areia média e estrutura maciça. A rocha é brechada ao longo do lineamento gerando *stockworks* de quartzo. A rocha no entorno apresenta-se altamente silicificada.

HL-24-4: Arenito médio, maciço, de coloração cinza escura, silicificado, aflorando como lajeados na encosta.

HL-24-5: Veios de lamprófiro. Ocorrem duas fácies dependentes da dimensão da intrusão; nas apófises menores, com < 10 cm de espessura, os fenocristais de máficos são raros e pouco desenvolvidos, já em numa de aproximadamente 30 cm de espessura ocorrem máficos de tamanho grande e em maior quantidade.

A ocorrência dos veios de quartzo e lamprófiros associados, embora seja parte integrante da assinatura espectral observada na imagem, não é suficiente em termos de dimensões para justificar as anomalias detectadas. A ocorrência de um arenito silicificado com baixa permeabilidade cuja atitude das camadas é concordante com a encosta onde foi detectada a anomalia pode explicar através da manutenção da umidade do perfil de solo pouco espesso, que assim é confundido com as áreas alvos.

### **3.2.10 HL-26 e PBE-01**

Os pontos com sigla PBE foram primeiramente visitados no contexto do Projeto Biblioteca Espectral, desenvolvido paralelamente a este, e assim a designação foi mantida. Os pontos estão localizados geologicamente nos depósitos efusivos vulcanoclásticos da Formação Hilário.

HL-26-1: Tufo lítico andesítico composto de cristaloclastos de plagioclásio e quartzo, vesículas estiradas preenchidas com carbonato e clorita e matriz afanítica de cor escura, identificada em lâmina delgada como clorita resultante de material devitrificado.

HL-26-2 Brecha vulcânica (ignimbrito), possui um arcabouço constituído essencialmente de blocos de rochas vulcânicas. Estes constituintes são sustentados por púmices e litoclastos de andesitos, definidos petrograficamente pelo predomínio de fenocristais de plagioclásio. Os blocos, em termos texturais, apresentam um baixo grau de arredondamento, sendo angulosos a subangulosos, e com diâmetros variando entre 7 a 20 cm. Alguns preservam as texturas originais como vesículas, amígdalas e orientação de fluxo, bem como a mineralogia, enquanto outros apresentam uma alteração avançada. A matriz tem textura tufácea e é constituída por púmices, litoclastos

de rocha vulcânica, a cristaloclastos de plagioclásio e raros vitroclastos. As dimensões dos componentes da matriz são variadas, ocorrendo desde partículas tamanho pó até lápili.

O Ponto PBE-01 é o ponto mais distante do CILS e foi selecionado principalmente pela similaridade espectral com a área piloto. A relação entre os diversos litotipos do perfil não foi estabelecida não havendo contatos aparentes entre eles.

PBE-01-1: Tufo lítico semelhante ao do ponto HL-26-1, porém com intensa cloritização da matriz, gerando uma rocha de coloração verde.

PBE-01-2: Lamprófiro de matriz afanítica intemperizada com fenocristais tabulares alongados, fraturado e com carbonato preenchendo as fraturas. Ocorre em um pequeno lajeado (Fig. 19).

PBE-01-3: Mesma rocha do ponto anterior. O Lamprófiro encontra-se pouco alterado, com poucas fraturas.

PBE-01-4, PBE-01-5 e PBE-01-6: Conglomerado com matriz arenito tufácea, com vesículas preenchidas por carbonato e clastos de andesito.

PBE-01-7: Não há afloramentos neste ponto na época vistoriada (Fig. 20). A imagem mostra uma anomalia aproximadamente do tamanho e da forma do campo alagadiço nesta área a qual, na época de intensa estiagem, a vegetação não causa interferência.



Figura 19: Visão geral do afloramento no ponto PBE-01-2.



Figura 20: Aspecto do terreno no ponto PBE-01-7. O perfil de solo é pouco espesso conservando a umidade do solo logo acima da rocha.

### **3.2.11 HL-40**

Este ponto representa o único afloramento de rocha contínuo registrado. A área aflorante estende-se por cerca de 500 m com largura variando de 50 a 100 m no leito do Arroio das Lavras (Fig. 21). É um bom exemplo de drenagem controlada por estrutura tectônica, sendo um “degrau” desenhado pelo cruzamento de três lineamentos.

A rocha presente nos pontos HL-40-1 e HL-40-2 é um sienogranito de textura média, equigranular, composto de feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, anfibólio e biotita. Intensamente fraturado, e sem feições marcantes de alteração.



Figura 21: a) vista geral da área aflorante no ponto HL-40-1; b) falha inversa em megabloco granítico; c) vista panorâmica da área do Ponto HL-40-1 a partir do ponto HL-40-2.

### 3.2.12 HL-41

Ponto localizado próximo da cidade de Lavras do Sul, a SE, na margem direita do Arroio das Lavras. A área apresenta grandes afloramentos próximos ao arroio e sinais de atividade mineradora por todo o morro onde foi realizado o perfil. As rochas identificadas são:

HL-41-1: Granodiorito de textura média a grossa composto de k-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita. Alguns cristais apresentam textura rapakivi. O afloramento é bastante fraturado e ocorrem três direções preferenciais de fraturamento e veios de quartzo dispersos. Os veios tem até 2 cm de espessura sendo que na direção (1) ocorrem veios de até 30 cm de espessura.

Direção 1: 328/88; 148/65; 323/78

Direção 2: 027/66; 033/64; 044/40

Direção 3: 293/28; 279/42; 295/40

HL-41-2: Lajeado de Monzogranito leucocrático composto por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, anfibólio e biotita ( $M' < 5$ ). Ocorrem veios de quartzo dispersos no afloramento que é alongado segundo leste-oeste; com fraturamentos expressivos nas seguintes direções:

182/66, 313/37, 144/45

As direções de fraturamento medidas condizem com os principais lineamentos assinalados para a área. No perfil entre os pontos 41-1 e 41-2 foi possível observar os efeitos da atividade mineradora na mudança da paisagem. A encosta do morro é coberta de rejeito das trincheiras, que ocorrem em profusão na parte superior do morro. As trincheiras na sua grande maioria são meras valas com pouca profundidade escavadas onde se percebe a ocorrência de veios de quartzo.

Esse quadro pode explicar a resposta obtida nas imagens, já que não foram identificadas feições de alteração relevantes neste ponto.

### **3.2.13 HL-42**

Ponto assinalado entre dois lineamentos de direção aproximada NW próximo à foz do Arroio do Jacques no Arroio Hilário.

HL-42-1: Tufo a pó; aspecto de rocha clástica maciça composta por material tufáceo com microvesículas em litoclastos preenchidas por um mineral verde (celadonita?).

HL-42-2: Dique de composição andesítica com fenocristais de plagioclásios de até 0,8 cm em matriz afanítica.

HL-42-3: Dique andesítico cortando tufo lítico– matriz afanítica com microfenocristais de plagioclásio e fraturas preenchidas por carbonato.

Não há afloramentos destacados na encosta do morro e as rochas apresentam pouca ou rara alteração em amostra de mão.

### **3.2.14 HL-43**

Rocha micromonzonítica a latítica com estruturas de mistura de magma, possivelmente andesítico, com zonas carbonatadas e sulfetos disseminados. A característica espectral sugere a indeitificação de litotipos alterados e mineralizados. Identificação dos sulfetos desta amostra foi realizada na investigação por MEV (tabelas 8, 9 e 10). A definição desta área ocorreu após os trabalhos de espectrorradiometria, o que explica a ausência de dados desta natureza referente ao ponto HL-43.

### **3.2.15 HL-46**

Esse ponto foi locado em uma composição RGB diferente das demais, e durante a seleção posterior foi mantido, porém não foi classificado como área alvo potencial não havendo feições características que o qualificassem.

HL-46-1: Monzonito com pórfiros de k-feldspato de até 3 cm aflorando em lajeados ou como blocos soltos na encosta. Alteração incipiente no máfico que ocorre como pequenos prismas dispersos em matriz microscristalina.

HL-46-2: Dique andesítico bastante alterado aflorando como cristas de 50 cm - 1 m de espessura e atitude 005/70. Rocha composta de fenocristais de plagioclásio e feldspato alcalino com máficos cloritizados e matriz bastante alterada. Ocorre ainda cortando o dique uma apófise fanerítica fina a afanítica possivelmente de mesma composição.

### **3.2.16 PBE-04**

Ponto junto à RS-357. Próximo à mina Dourada

PBE-04-1: Lava andesítica de cor cinza escura caracterizado por fenocristais de plagioclásio e matriz afanítica. Ocorrem sulfetos (pirita) disseminados na rocha que não apresenta feições de alteração.

PBE-04-2: Ignimbrito andesítico muito pouco alterado junto à fraturas com pouco sulfetos disseminados na matriz da rocha.

PBE-04-3: Brecha hidráulica com andesito muito alterado, quartzo e óxidos de ferro. A rocha alterada perde a cor característica e não apresenta os sulfetos típicos da fração “sã”.

PBE-04-4: Ignimbrito andesítico sulfetos disseminados em grande quantidade e também concentrados em fraturas.

PBE-04-5: Corte ao lado da estrada com andesito não alterado sem sulfetos disseminados.

A característica espectral do andesito é dominada pela resposta espectral do plagioclásio não havendo correlação com as feições inicialmente observadas. Também na área não foi identificado nenhuma feição que pudesse mascarar a resposta espectral do terreno.

### **3.3 Petrografia**

Neste item são sumarizados os dados petrográficos com o objetivo de sustentar melhor as conclusões sobre as diferentes feições espectrais observadas nas imagens de processamento digital e as curvas espectrais obtidas para as amostras macro. Foram selecionadas 20 amostras diversas para tentar estabelecer uma melhor correlação entre os dados de campo e as assinaturas espectrais verificadas para os alvos. A petrografia foi realizada em caráter expedito para reconhecimento da mineralogia de primária acrescentando-se resultados petrográficos mais detalhados e de química mineral que foram discutidos por Lima (1985). Após é discutido as alterações hidrotermais observadas.

#### **3.3.1 Lavas andesíticas**

As rochas efusivas de natureza intermediária são petrograficamente classificadas como andesitos caracterizam-se pelo elevado conteúdo de fenocristais de plagioclásio, em associação a percentagens baixas de minerais

máficos. A utilização do termo andesito, no presente trabalho restringindo-se aos aspectos descritivos das rochas efusivas intermediárias da região de Lavras do Sul, que dominam volumetricamente entre os vulcanitos. As características texturais e mineralógicas são compatíveis com a classificação destas rochas como andesitos.

Em termos macroscópicos, é comum a todas as rochas dos diferentes depósitos uma tonalidade verde escura ou castanha avermelhada, quando oxidadas.

Estes vulcanitos são constituídos por fenocristais de plagioclásio e, subordinadamente, clinopiroxênio, olivina, magnetita e apatita, envolvidos por uma matriz rica em micrólitos e cristálitos de plagioclásio, além de material originalmente vítreo com birrefringência próximo a zero.

Os fenocristais de plagioclásio possuem hábitos distintos que permitem separá-los em 3 grupos: i) cristais tabulares alongados subédricos a euédricos ii) grãos anédricos, de contornos variados, por vezes com aspecto clástico; e iii) grãos arredondados com extinção ondulante.

O primeiro tipo caracteriza-se pela presença frequente de maclas do tipo albita e pela combinação albita-periclínio, contendo, de forma subordinada, zonações mais espessas que o tipo anédrico. Dados de química mineral discutidos por Lima (1995) indicam que os cristais, com um teor de  $An_{47}$  até  $An_{57}$ , têm diâmetros variados, de 1,5 mm até 2 cm, predominando, porém, a dimensão de 9 mm. Os plagioclásios tabulares geralmente contêm irregularidades, concentradas segundo os traços de maclas e clivagens. Estas irregularidades assumem formas alongadas, triangulares e semi-arredondadas, que são ocupadas por material microcristalino da matriz, que é constituído de micrólitos, por vezes aciculares, e cristálitos de plagioclásio, além de grãos de dimensões muito reduzidas de minerais opacos. Esta associação mineral é envolvida por uma massa de baixíssima birrefringência a isotropa, preta a castanha avermelhada à luz natural, de possível natureza vítrea. O conjunto cristais aciculares-vidro, que ocupa as irregularidades, atesta uma condição de resfriamento rápido para este material

Os fenocristais anédricos têm contornos agudos, geralmente alongados, com uma maior densidade de irregularidades internas,

evidenciando, em alguns casos, verdadeiras texturas em peneira. Ao contrário do tipo tabular, as zonações são nítidas, e as maclas subordinadas. As primeiras são do tipo oscilatório e, por vezes, truncadas. Possuem um teor médio de  $An_{48}$  (Lima, 1985) e dimensões variadas, desde 0,8 mm até 6 mm, predominando, no entanto, o diâmetro de 4 mm. A observação detalhada dos grãos revela um padrão extremamente irregular no crescimento, gerando bordas sinuosas, além de prolongamentos tabulares, a partir dos vértices de alguns fenocristais.

A forte zonação preservada nos plagioclásios esqueletais parece estar relacionada à velocidade de resfriamento mais rápida destes cristais. Portanto, o contraste entre os fenocristais tabulares e esqueletais, tanto na forma, como na frequência e no tipo de zonação, parece estar vinculado a diferentes taxas de resfriamento impostas a estes dois grupos de cristais.

Os plagioclásios com hábito arredondado possuem um teor máximo de  $An_{30}$  (Lima 1985) e dimensões inferiores (0,5-2 mm) àquelas dos tipos tabular e esquelital. Ocorrem com uma percentagem muito reduzida, e têm zonações discretas, com limites mal definidos, causando um falso aspecto de extinção ondulante ao microscópio. Internamente, possuem finas irregularidades que, no conjunto, resultam em um aspecto dendrítico. Esta feição foi interpretada por Tsuchiyama e Takahashi (1983) como sendo uma textura relacionada à fusão (*dendritic melting pattern*).

O clinopiroxênio é raro nas amostras estudadas e quando preservado ocorre como fenocristais subédricos a euédricos, retangulares e, de modo menos frequente, alongados, com bordas suavizadas por um sutil padrão de arredondamento. O conjunto de cristais, independente do hábito, possui dimensões da ordem de 0,4 mm até 2,8 mm, com o diâmetro mais frequente de 1,2 mm, e composicionalmente classificados como augita.

Os clinopiroxênios apresentam um pleocroísmo muito fraco, variando de incolor a tons de verde claro. As zonações, embora poucos frequentes, são constatadas principalmente nas bordas, com um padrão de birrefringência contrastante com o núcleo. As maclas são comuns segundo  $\{001\}$ .

A textura glomeroporfírica é bastante frequente e reúne, na forma de um agregado monocristalino, fenocristais ligeiramente arredondados de

clinopiroxênio em geral cloritizados. É comum a presença de inclusões euédricas de magnetita nestes agregados, o que define uma textura poiquilítica.

Fenocristais de olivina completamente transformados foram constatados em uma das amostras andesíticas estudadas. A olivina apresenta-se alterada para boulingita, iddingsita e, menos frequentemente, para carbonato.

A olivina em rochas andesíticas é de presença comum, conforme os dados reunidos por Ewart (1982), e pode mesmo estar presente em rochas com até 60% de  $\text{SiO}_2$  (Gill 1981). A estabilidade de olivinas em magmas mais diferenciados é explicada pela presença de um conteúdo elevado de cátions monovalentes, que possibilita uma expansão do campo da forsterita em relação ao piroxênio, conforme demonstrado por Kushiro (1975). No caso das rochas intermediárias de Lavras do Sul, o conteúdo relativamente elevado de  $\text{K}_2\text{O}$  pode ter sido responsável pela redução na atividade de  $\text{SiO}_2$  permitindo, desta forma, a estabilização da olivina.

Os minerais acessórios são magnetita e apatita, que ocorrem na condição de microfenocristais subédricos a euédricos, caracterizando a saturação de fósforo no líquido andesítico.

A magnetita ocorre como microfenocristais, com dimensões desde 0,3 mm até 0,5 mm, e como inclusões em clinopiroxênios. É subédrica a euédrica, tendo os microfenocristais, em alguns casos, faces incompletas que são invadidas pelo material da matriz.

Os micrólitos e cristálitos de plagioclásio predominam na matriz das rochas andesíticas, acompanhados por cristais submicroscópicos de minerais opacos. Um material de cor castanha escura a preta à luz natural, com birrefringência muito baixa, envolve estes minerais e deve representar a porção originalmente vítrea dessas rochas. Os micrólitos estão geralmente alinhados segundo a direção do fluxo magmático, definindo uma textura do tipo hialopilítica a pilotaxítica. Observa-se em algumas amostras a presença de inúmeros grãos submicroscópicos de carbonato, provavelmente de natureza hidrotermal, que conferem à matriz uma coloração castanha.

### 3.3.2 Monzonitos

As rochas monzoníticas afloram como diques e intrusões rasas equigranulares, que constituem o tipo litológico dominante na porção norte do Complexo Intrusivo de Lavras do Sul, onde definem uma feição semi-circular, e como pequenas intrusões porfíricas. Composicionalmente, ocupam os campos dos monzonitos e quartzo monzonitos no sistema QAP (Streckeisen 1976). Em termos texturais podem ser separados em dois grandes grupos: i) rochas monzoníticas equigranulares, e ii) rochas monzoníticas porfíricas.

Os monzonitos equigranulares são macroscopicamente rochas faneríticas médias a grossas, com uma foliação magmática incipiente, definida pela orientação, por vezes descontínua, de plagioclásio e feldspato alcalino. A composição quartzo monzonítica é dominante neste grupo e os minerais máficos presentes são hornblenda e biotita, além de relictos de clinopiroxênio. As características texturais e as proporções entre os minerais permitem classifica-las como biotita-hornblenda quartzo monzonitos e augita-hornblenda monzonitos.

O plagioclásio é subédrico a euédrico, com hábito tabular alongado, sendo comuns maclas polissintéticas, acompanhadas em alguns casos, de largas zonações sendo a dimensão mais frequente desta fase 3 mm e a composição média é de An<sub>32</sub>. Os espaços finais entre os grãos em geral são ocupados por quartzo e, subordinadamente, feldspato alcalino. Este último ocorre também com hábito retangular, não tão alongado quanto o plagioclásio, com uma dimensão em torno de 2 mm, e geralmente micropertítico. Inclusões de anfibólio, apatita e plagioclásio são observadas em alguns grãos. O feldspato alcalino, quando na condição intersticial, é anédrico e, localizadamente, observa-se o intercrescimento desta fase com quartzo, definindo uma textura micrográfica.

O anfibólio é a fase máfica percentualmente dominante. Este é subédrico a euédrico, com hábito prismático alongado e, por vezes, orientado segundo o fluxo magmático. Possui um pleocroísmo g= castanho esverdeado, b= castanho e a= amarelo-claro, compatível óticamente com o grupo da hornblenda. A presença de inclusões de minerais opacos e apatita é comum,

bem como a ocorrência de restos de clinopiroxênio, junto à porção central de alguns cristais. Estes, tipicamente são compatíveis com o grupo da augita, e evidenciam que, pelo menos parte dos anfibólios, foi gerada a partir de reações de transformação do clinopiroxênio. Mesmo que a maior parte dos grãos de hornblenda mostre-se preservado, constata-se a presença de outro tipo de anfibólio, possivelmente tremolita, concentrado na forma de agregados aciculares, nas porções centrais de alguns cristais.

Agregados de minerais máficos, constituídos por anfibólio e biotita são comuns nestas rochas. Em alguns destes, observa-se a presença de plagioclásio, geralmente zonado. Os anfibólios destes agregados em geral estão parcialmente transformados para minerais opacos que se distribuem aleatoriamente. Estes agregados podem ser interpretados como cumulados precoces extraídos das paredes e/ou concentrados através do fluxo magmático em um líquido mais evoluído. Não se descarta, no entanto, a possibilidade de que a mineralogia agora presente nestes agregados, tenha resultado do reequilíbrio dos glomerocristais com o líquido quartzo monzonítico.

A biotita ocorre como palhetas isoladas ou associadas ao anfibólio e constitui, em alguns casos, a fase dominante dos aglomerados de minerais máficos. Possui um forte pleocroísmo castanho avermelhado a castanho e, por vezes, é transformada para clorita. Inclusões de apatita, zircão e de minerais opacos estão presentes em algumas palhetas.

O clinopiroxênio na forma de grãos isolados, é escasso (<1%), euédrico a subédrico, e ao microscópico, é muito semelhante ao tipo parcialmente substituído por anfibólio.

As fases acessórias são constituídas por apatita, zircão, minerais opacos (magnetitas) e, de forma subordinada, esfero. A apatita apresenta-se na forma de prismas euédricos, e o zircão, com um hábito arredondado.

Os monzonitos porfiríticos ocorrem como pequenos corpos, *necks* vulcânicos e diques associados às rochas monzoníticas equigranulares. As porções entre os minerais permitem classificá-las como biotita-hornblenda quartzo monzonitos e como augita-hornblenda monzonitos. Em alguns casos, a variação no diâmetro dos cristais de feldspato potássico nos monzonitos

porfíricos permite definir fácies distintas: i) fácies média a grossa, onde dominam megacristais da ordem de 2,5mm a 5 mm e, ii) fácies muito grossa, na qual os cristais com 5 cm são abundantes. Estas fácies ocorrem, por vezes, associadas, definindo porções distintas em afloramento, como pode ser observado ao longo do quilómetro cinquenta e um da RS-357, onde ocorre cerca de 600 metros de exposição destas litologias. Observa-se destacadas variações texturais com alguns locais com uma petrografia micromonzonítica a latítica (HL-43).

Ambas as fácies possuem feldspato alcalino com película de cor castanha avermelhada cobrindo os grãos. Esta fase, de hábito tabular a arredondado, tem macla de Carlsbad e, em alguns casos, textura *rapakivi*, definida pela presença de um anel de plagioclásio com  $An_{15}$ .

A textura poiquilítica ocorre na forma de inclusões de plagioclásio, anfibólio, apatita e zircão nos fenocristais de feldspato potássico, enquanto a feição de exsolução está representada pela micropertita. A presença comum de inclusões é indicativa de uma cristalização mais tardia para o feldspato alcalino. Swanson (1977) sugere que os grandes cristais desta fase podem ser tardios, no curso da cristalização, desde que a taxa de crescimento do feldspato potássico atinja um valor máximo na presença de uma baixa densidade de núcleos. E o máximo desenvolvimento do feldspato potássico, neste caso, deve ocorrer próximo a temperatura *solidus*.

A presença de plagioclásio é observada na forma de fenocristais, possivelmente precoces, no curso da cristalização, e como constituintes da matriz. Os fenocristais possuem dimensões desde 1,5 mm até 8 mm, e formam duas populações distintas. A primeira caracteriza-se por um hábito tabular alongado, com os vértices suavemente arredondados, e com maclas polissintéticas, do tipo albita e a combinação albita-periclínio, bem definidas. Quimicamente podem ser classificados como oligoclásio e andesina, e percentualmente, são mais abundantes.

O quartzo, na forma de fenocristais, ocorre apenas nas composições quartzo monzoníticas, e restringe-se à matriz nas rochas menos diferenciadas. Os fenocristais de quartzo possuem uma dimensão média de 3 mm, e

mostram restos de contornos do tipo bipiramidado, com forma subarredondada e embainhados por reabsorção.

O clinopiroxênio ocorre nos termos menos diferenciados como fenocristais, com percentagens em torno de 1%, e com um fraco pleocroísmo em tons esverdeados pálidos. Os grãos têm um hábito levemente alongado, e sendo comum a presença de inúmeras inclusões de plagioclásio, apatita e de minerais opacos. Felspatos e quartzo da matriz invadem, parcialmente, o limite dos grãos de clinopiroxênio, conferindo a estes um aspecto esquelético.

O anfibólio dos monzonitos porfiríticos ocorre como fenocristais, com dimensões desde 2 mm até 4 mm, cujos grãos, na maior parte dos casos, euédricos a subédricos, têm uma fórmula pleocróica semelhante àquela definida para as rochas lamprofíricas da ASLS. Constitui a fase máfica dominante tanto na fácies muito grossa como na média a grossa. Constata-se, embora de forma pouco frequente, a presença de pequenos núcleos de clinopiroxênio envolvidos por anfibólio, demonstrando que esta última fase se formou, pelo menos em parte, a expensas dos piroxênios precoces. A inclusão parcial e/ou total de anfibólios em alguns fenocristais de plagioclásio sugere uma etapa de contemporaneidade entre estas duas fases, no curso da consolidação das rochas monzoníticas.

Outra fase máfica hidratada importante, presente nas rochas monzoníticas, é a biotita. Apresenta-se como fenocristais isolados e/ou em associação com anfibólio e clinopiroxênio. Neste último caso, ocorre como palhetas bem definidas ou ao longo das clivagens e limites dos grãos dos demais máficos da associação. Possui uma maior abundância nas rochas mais diferenciadas e uma dimensão média de 2,2 mm. As palhetas têm um forte pleocroísmo definido por a=castanho e b=g=castanho avermelhado. Nos fenocristais de biotita são comuns inclusões de minerais opacos e, de forma subordinada, zircão. Estas inclusões, juntamente com apatita, constituem a mineralogia acessória dessas rochas.

A matriz é fanerítica fina a média, constituída por feldspatos e quartzo. O feldspato potássico da matriz é subédrico a anédrico com dimensões inferiores a 0,25 mm e, na maior parte dos grãos, não são observadas maclas. O plagioclásio é subédrico, mais albitico que os fenocristais e possui uma

dimensão média de 0,30 mm, nas rochas com matriz fina, e 0,70 mm naquelas com matriz fanerítica média. O quartzo mostra-se anédrico e ocupa os interstícios entre os feldspatos.

Os diques monzoníticos distinguem-se dos monzonitos porfiríticos por apresentarem dimensões bem mais reduzidas dos fenocristais de feldspatos (1,5 mm), uma maior abundância de fenocristais de anfibólio e uma matriz holocristalina fina a média. De forma localizada, como no caso do afloramento no quilômetro cinquenta e um da RS-357, observa-se a presença de estruturas semelhantes a diques, que possuem contatos difusos com a “encaixante” e são caracterizadas pela presença abundante de megacristais de feldspato alcalino (5 cm), alinhados de acordo com o fluxo magmático. Tais estruturas possivelmente representam líquidos tardios acrescidos de feldspatos situados nas porções de topo das intrusões monzoníticas. Agregados de minerais máficos, dominados por anfibólio e biotita, ocorrem de forma localizada e podem estar relacionados a minerais acumulados precocemente.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na amostra HL-43 foi utilizada na determinação dos sulfetos disseminados. Foram identificadas no MEV pirita, calcopirita, arsenopirita e ouro. Caracterização química de piritas (tabela. 8) e arsenopiritas (tabela) são apresentados abaixo.

Tabela 8 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de pirita

Pirita	Fe	S	As	Co	Ni	Au	Cu	Zn	Ag	Sb	Te	Bi
%p.												
máximo	47,961	53,986	3,037	0,363	0,067	0,178	0,155	0,063	0,082	0,085	0,044	0,109
mínimo	46,158	51,128	0,178	0,001	0,002	0,003	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001	0,003
%at												
máximo	34,260	66,560	1,630	0,250	0,050	0,040	0,100	0,040	0,050	0,030	0,010	0,020
mínimo	33,340	64,520	0,000	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
N	52	52	18	16	37	26	40	24	30	35	24	24
T.A.	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52

%p: percentagem em peso; %at percentagem atômica; N: nº de detecções; T. A.: total de análises

As proporções atômicas de As nos grãos de arsenopiritas concentram-se no intervalo de 31% a 32,5% e a correlação dos dados de S e As nas arsenopiritas indica uma forte correlação inversa ( $r = -0,95$ ), sugerindo a incorporação de As nos domínios do S.

Tabela 9 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de arsenopirita.

Arsenopirita	Fe	S	As	Co	Ni	Au	Cu	Zn	Ag	Sb	Te	Bi
%p.												
Máximo	35,859	21,889	45,755	0,454	0,047	0,091	0,037	0,016	0,052	0,214	0,034	0,073
Mínimo	34,750	19,953	41,495	0,004	0,001	0,015	0,002	0,003	0,011	0,001		0,013
%at												
Máximo	34,040	36,500	32,390	0,410	0,040	0,020	0,030	0,010	0,030	0,020	0,010	0,020
Mínimo	33,610	tabel	29,61	0,180	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010		0,010
N	10	10	10	4	5	8	7	3	4	7	1	6
T.A.	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

%p: percentagem em peso; %at percentagem atômica; N: nº de detecções; T. A.: total de análises

Nas calcopiritas investigadas as variações composicionais avaliadas por *Back Scattered Electrons (BSE)* são muito pequenas, sendo baixos os teores de As, Zn, Ni, Co, Sb, Au, Ag, Te e Bi (tabela 10)

Tabela 10 - Resultados das análises químicas MEV-EDS dos grãos de calcopirita.

Calcopirita	Fé	S	Cu	As	Co	Ni	Au	Zn	Ag	Sb	Te	Bi
%p.												
máximo	31,184	35,673	34,592	0,153	0,016	0,09	0,114	0,03	0,076	0,044	0,06	0,108
mínimo	29,339	30,056	32,844	0,011	0,005	0,003	0,02	0,001	0,002	0,001	0,001	0,048
%at												
máximo	25,53	51,27	25,07	0,09	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
mínimo	24,35	49,98	23,64	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
N	16	16	16	11	5	12	6	5	7	10	8	2
T.A.	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

%pt: percentagem em peso; %at percentagem atômica; N: nº de detecções; T. A.: total de análises

### 3.3.3 Lamprófiro espessartítico

Um litotipo importante gerado no magmatismo shoshonítico de Lavras do Sul a ocorrência de lamprófiros na forma de diques, domo e lavas, descritos por Lima e Nardi (1991). Estas litologias se caracterizam pela textura panidiomórfica, definida pela euedria dos fenocristais de anfibólios e piroxênios, envolvidos por uma matriz constituída de micrólitos e microfenocristais de plagioclásio e, raramente, feldspato potássico. A textura

dominante e a mineralogia presente permitem classificar os lamprófiros como espessartíticos e de afinidade shoshonítica (Streckeisen 1979; Rock 1987).

As lavas lamprofíricas, embora raras na região estudada, se caracterizam por uma textura porfírica menos destacada e pelo menor tamanho dos fenocristais de minerais máficos (0,1 até 0,6 mm). Distinguem-se também dos termos hipabissais pela maior concentração de amígdalas preenchidas por carbonato e pela ocorrência subordinada de calcedônia. Em termos composicionais, são rochas intermediárias associadas à parte superior de uma estrutura principal, dômica, de mesma composição.

O anfibólio é o fenocristal dominante nestes vulcanitos, com um hábito tabular alongado euédrico a subédrico, e, por vezes, esquelético. Destaca-se nesta fase, o avançado estágio de transformação para magnetita, pobre em titânio, e calcita, a qual não modifica o hábito original. Nos grãos parcialmente alterados, observa-se uma composição do tipo hastingsita (Leake, 1978). Os fenocristais tendem a se orientar segundo o fluxo magmático e, localizadamente, se concentram em agregados monocristalinos originando uma textura glomeroporfírica.

A biotita é rara, com uma frequência inferior a 1%, e caracteriza-se por um forte pleocroísmo em tons castanhos avermelhados, possivelmente decorrentes da oxidação.

Os grãos de apatita se assemelham àqueles descritos para as rochas andesíticas, e constituem a única fase acessória presente nas lavas.

Constatou-se em algumas amostras a presença de raros xenocristais (?) de plagioclásio, de dimensões semelhantes a ligeiramente superiores àquelas descritas para os anfibólios. Possuem segundo Lima (1985) um teor de  $An_{28-35}$  e um hábito subarredondado decorrente da dissolução pelo líquido lamprofírico. O elevado conteúdo de voláteis no magma, como indicado pela precocidade e euedria dos fenocristais de anfibólio, inibiu a cristalização de feldspatos (Burnham 1979). Desta forma, grãos de feldspato que tiveram acesso ao líquido, seja através de processos do tipo mistura de magmas ou assimilação, estariam em desequilíbrio.

A matriz é fanerítica fina a afanítica e texturalmente caracteriza-se pela saliente orientação dos micrólitos de feldspatos. Os plagioclásios têm um

hábito tabular ligeiramente alongado, raramente maclados e possuem um teor de An variável, desde albita até andesina. Diversos grãos mostram uma alteração superficial para carbonato + mica branca. Esta alteração deve ter sido responsável pela retirada de parte do conteúdo original de cálcio nesta fase, o que explica a grande variação nos teores de An.

### **3.3.4 Tufos andesíticos**

Rochas tufáceas na região de Lavras do Sul foram originalmente descritas por Robertson (1966) que as relacionou a um regime de queda, sendo unidades estas estudadas detalhadamente por Lima e Nardi (1985), Wildner e Lima (1992), Lima (1995), que destacaram os principais aspectos petrográficos das mesmas.

Estes litotipos possuem em campo estratificações plano-paralela e cruzada de baixo ângulo, marcadas por contraste granulométrico de seus constituintes. São observados padrões de granodecrescência, que mostram uma ciclicidade.

Os constituintes são litoclastos, cristaloclastos e, subordinadamente, vitroclastos misturados em proporções variadas e com dimensões desde 0,06 mm até 50 mm. A combinação de critérios composicionais e de dimensão dos grãos (Fisher e Schmincke 1984) permite classificar as rochas como tufos a pó, tufos líticos e de cristal e lápili-tufos líticos. Ocorrem associados e intercalados entre os derrames. Os litoclastos são de origem vulcânica, com textura porfirítica em uma matriz afanítica além da presença de amígdalas e vesículas. Os fragmentos, na maior parte dos casos, são de composição andesítica, caracterizada pela presença de fenocristais de plagioclásio ( $An_{40}$ ) e raros grãos de clinopiroxênio, identificados oticamente como augita. Os litoclastos de rochas básicas possuem uma mineralogia semelhante acrescidos de olivina.

Os cristaloclastos são geralmente de plagioclásio, associados a pequenas quantidades de quartzo e minerais opacos. Possuem com hábito tabular alongado e dimensões entre 0,6 mm até 20 mm. A alteração

hidrotermal é representada pela paragênese epidoto (pistacita)+ mica branca + albita± carbonato.

Os fragmentos vítreos maciços são de cor preta (taquilitos) a avermelhada (sideromelano) sob nicóis paralelos, diferente dos *shards*, que possuem uma geometria em meia-lua e cúspide, típica de fragmentos vítreos de paredes de bolhas.

Tufos de cristal são volumetricamente mais raros e compostos de cristaloclastos de plagioclásio com hábito tabular alongado e macla polissintética e clinopiroxênio com hábito tabular alongado em matriz composta predominantemente por microcristais de plagioclásio e em menor proporção, clorita e epidoto como produtos de alteração. Ocorre em partes da matriz cristalização de clorita como produto de devitrificação. Calcita poiquilotópica envolve cristais de clinopiroxênio e plagioclásio.

Ocorrem fragmentos originalmente vítreos, maciços de cor preta (taquilitos) a avermelhada (sideromelano) sob nicóis paralelos, diferente dos *shards*, que possuem uma geometria em meia-lua e cúspide, típica de fragmentos vítreos de paredes de bolhas.

### **3.3.5 Brechas Vulcânicas - Ignimbritos**

A definição desta unidade segue os critérios de Fisher e Schminke (1984), que consideram uma brecha vulcânica como um agregado de blocos (fragmentos > 64 mm) de origem predominantemente efusiva, contendo menos de 25% de fragmentos do tipo lápili (fragmentos > 2 mm e < 64 mm) e cinza ( fragmentos < 2 mm).

As brechas ocorrem intercaladas, de modo predominante, entre os derrames intermediários e tufos de queda. Possuem um arcabouço constituído essencialmente de blocos de rochas vulcânicas intermediárias. Entre os constituintes de natureza vulcânica predominam os andesitos, definidos petrograficamente pelo predomínio de fenocristais de plagioclásio. Os blocos em termos texturais apresentam um baixo arredondamento, sendo angulosos a subangulosos, e com diâmetros variando entre 7 a 10 cm. Alguns preservam

as texturas originais como vesículas, amígdalas e orientação de fluxo, bem como a mineralogia, enquanto outros apresentam uma alteração avançada.

A matriz tem uma textura tufácea, e é constituída por púmices, litoclastos de rocha vulcânica, a cristaloclastos de plagioclásio e raros vitroclastos. As dimensões dos componentes da matriz são variadas, ocorrendo desde partículas tamanho pó até lápili (segundo os critérios de Fisher 1966).

Os púmices possuem uma geometria alongada gerada pelo achatamento e soldagem, sendo comuns alterações para clorita+carbonato.

Os litoclastos têm composições semelhantes aos blocos, e os cristaloclastos possuem um hábito tabular alongado e, em geral, estão alterados para mica branca, pistacita e carbonato.

Os vitroclastos podem ser identificados através de suas formas em cúspide, em "Y" e em meia-lua. Estes constituintes mostram desvitrificação para um material de cor verde, com baixa birrefringência, definido oticamente como clorita.

Fenocristais de plagioclásio ( $An_{25-35}$ ) preservados da fragmentação e cristaloclastos dão um padrão textural porfíritico, observando-se também e feldspato alcalino e quartzo envolvidos pela matriz tufácea (latitos?). Feições de corrosão são comuns nos grãos de quartzo, sendo este geralmente subédrico. Feições perlíticas e esferulitos foram geradas pela desvitrificação.

A origem das brechas está vinculada a fluxos piroclásticos de púmices, podendo ser estes depósitos classificados como ignimbritos. A abundância de blocos de andesitos sugere uma condição proximal do depósito, gerado provavelmente pelo colapso do sistema vulcânico (caldera).

### **3.3.6 Biotita Monzogranito**

Rocha de textura porfírica com fenocristais de plagioclásio, feldspato alcalino e quartzo em matriz de quartzo microcristalino, plagioclásio, feldspato potássico e biotita.

O feldspato acalino e plagioclásio, tanto mega e fenocristais, como da matriz, encontram-se argilizados e em alguns pontos mostrando feições de reabsorção. O quartzo como fenocristal também mostra bordas reativas em feições de reequilíbrio com o quartzo microcristalino da matriz.

A biotita tem forte pleocroísmo marrom com incipiente alteração junto aos planos de clivagem.

### **3.3.7 Monzogranito leucocrático**

A rocha possui textura porfirítica com fenocristais de feldspato potássico e plagioclásio. Ambos fenocristais ocorrem com habito tabular curto, limites de grão irregulares e zonados com as zonações marcadas por níveis de alteração concêntricos ao grão.

Os espaços intergrãos são preenchidos por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio e, pouco abundante, clinopiroxênio. Como mineralogia acessória ocorre zircão, titanita, epidoto.

### **3.3.8 Caracterização do Hidrotermalismo na região de Lavras do Sul**

Os fenômenos hidrotermais que, em proporções variadas, afetaram as rochas vulcânicas e plutônicas da região de Lavras do Sul ainda são ainda objeto de estudo e gradativamente os dados indicam vinculações com as mineralizações encontradas nesta região.

Trabalho histórico de Goñi (1961) faz referência ao avançado estado de alteração dos minerais das rochas andesíticas de Volta Grande quando nas proximidades de mineralizações. Estas rochas apresentam, por vezes, processos de modificações intensos na matriz, além da neoformação de albita, hornblenda, biotita, penina, zoisita, pistacita e calcita. Kaul e Zir F° (1974) atribuem a origem da mineralização sulfetada de Lavras do Sul à ascensão de fluidos mineralizantes, ligados a fases residuais do magmatismo granítico, que se introduziram em superfícies estruturais

preferenciais. Estes mesmos autores sugerem que a alteração hidrotermal pode ser considerada como um guia adicional na prospecção de corpos mineralizados.

Nardi (1984), discutindo os fenômenos hidrotermais e a mineralização do Complexo Granítico Lavras, observa que as rochas graníticas das porções central e transicional do referido complexo são afetadas por alteração propilítica nas proximidades das zonas mineralizadas, até 20 ou 30m dos veios de quartzo. A mineralogia original é alterada, sendo os minerais máficos cloritizados, os plagioclásios parcialmente sericitizados e os feldspatos adquirindo um aspecto turvo. As fases hidrotermais predominantes são constituídas por clorita, epidoto e calcita. Nas zonas onde os sulfetos e o ouro estão presentes, a sericitização se torna mais acentuada, com alteração dos minerais máficos para calcita e a substituição total do plagioclásio por sericita e/ou calcita. Nas porções de borda deste complexo, representadas pelo pertita granito, aquele autor constatou a presença de alteração do tipo propilítica que é, por vezes, associada às zonas de maior concentração de pirita.

Posteriormente, Lima (1985 a,b) identificou uma convergência entre os dados geoquímicos dos vulcanitos da Formação Hilário com os do núcleo deste complexo, o que permitiu a definição e a proposição da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS) por Nardi e Lima (1985).

Investigações recentes permitiram identificar áreas hidrotermalizadas ainda não descritas e a presença de ouro livre e platina nos lamprófiros espessartíticos (Sommer e Lima em prep.). Análises de química mineral nos sulfetos em diques tardios reslizados por Liz *et al.* (2004) mostraram que a pirita possui zonações e conteúdos variáveis de arsênio e inclusões de ouro. Foram também identificados grãos de ouro livre e prata nativa, sendo estes dois últimos envolvidos por uma matriz hipocristalina rica em sílica, alumínio, potássio e cloro. Estimativas da temperatura aproximada de formação dos sulfetos, a partir da química mineral da arsenopirita, indicaram intervalos entre 330° e 450°C (Liz *et al.* 2004).

Foram estudadas petrograficamente as amostras de alvos anômalos que apresentaram alterações hidrotermais. A partir da forma de colocação

das principais fases hidrotermais das rochas da podem ser genericamente divididas em dois grupos a) alterações concentradas na matriz das rochas vulcânicas e tufáceas que substituem na maior parte das vezes, parcial ou totalmente, os fenocristais; b) alterações concentradas em veios e microveios, em muitos casos monominerálicas, que cortam indistintamente todas as litologias da área.

No primeiro caso as rochas foram fortemente afetadas por fenômenos hidrotermais. A alteração hidrotermal pode ser classificada, conforme Rose e Burt (1979) como do tipo propilitização e sericitização. Esta última, na área de estudo, é muito pouco expressiva e identificada em um pequeno número de amostras, onde a mica branca ocorre associada a baixas percentagens de clorita.

A alteração propilítica reconhecida amplamente nas rochas vulcânicas consiste principalmente de clorita, epidoto e carbonato, que podem estar acompanhados por quantidades menores de quartzo, albita, argilo-minerais, óxidos de ferro e sericita.

Na matriz das rochas vulcânicas e tufáceas a clorita ocorre, geralmente como cristais agrupados sem uma orientação e com pleocroísmo em tons de verde, sugestiva das espécies ricas em ferro (Deer et alii, 1976). Os minerais máficos são, por vezes, completamente substituídos por clorita, bem como as vesículas e as amígdalas dos litoclastos das rochas tufáceas. Cristais de biotita raramente são preservados.

O epidoto, oticamente identificado como pistacita, substitui parcial a totalmente os plagioclásio, sendo esta fase transformada em albita, e é geralmente associado à calcita. Nas rochas tufáceas se observa, de forma freqüente, a substituição de plagioclásio por epidoto, albita e carbonato, em condições pseudomórfica onde a forma original dos cristais preservada. A presença de epidoto é também constatada em litoclastos.

A calcita ocorre como massas irregulares na matriz das rochas piroclásticas ou, ainda, substituindo os cristaloclastos das rochas tufáceas e os fenocristais das rochas vulcânicas. Ocorre também de forma freqüente, em veios e microveios que, por vezes, se bifurcam segundo padrões preferenciais de fraturas.

O quartzo mostra duas formas distintas: como veios, geralmente descontínuos e de espessuras milimétricas e, de forma mais rara, como mosaicos microscópicos com textura granoblástica compatível com processos de silificação.

A albita representa a descalcificação da composição original e em alguns casos forma anéis que circundam os plagioclásios e é óticamente reconhecida pelo seu relevo inferior ao do bálsamo de Canadá e ainda por seu aspecto límpido quando comparada ao cristal alterado. De um modo geral está associada à calcita e ao epidoto.

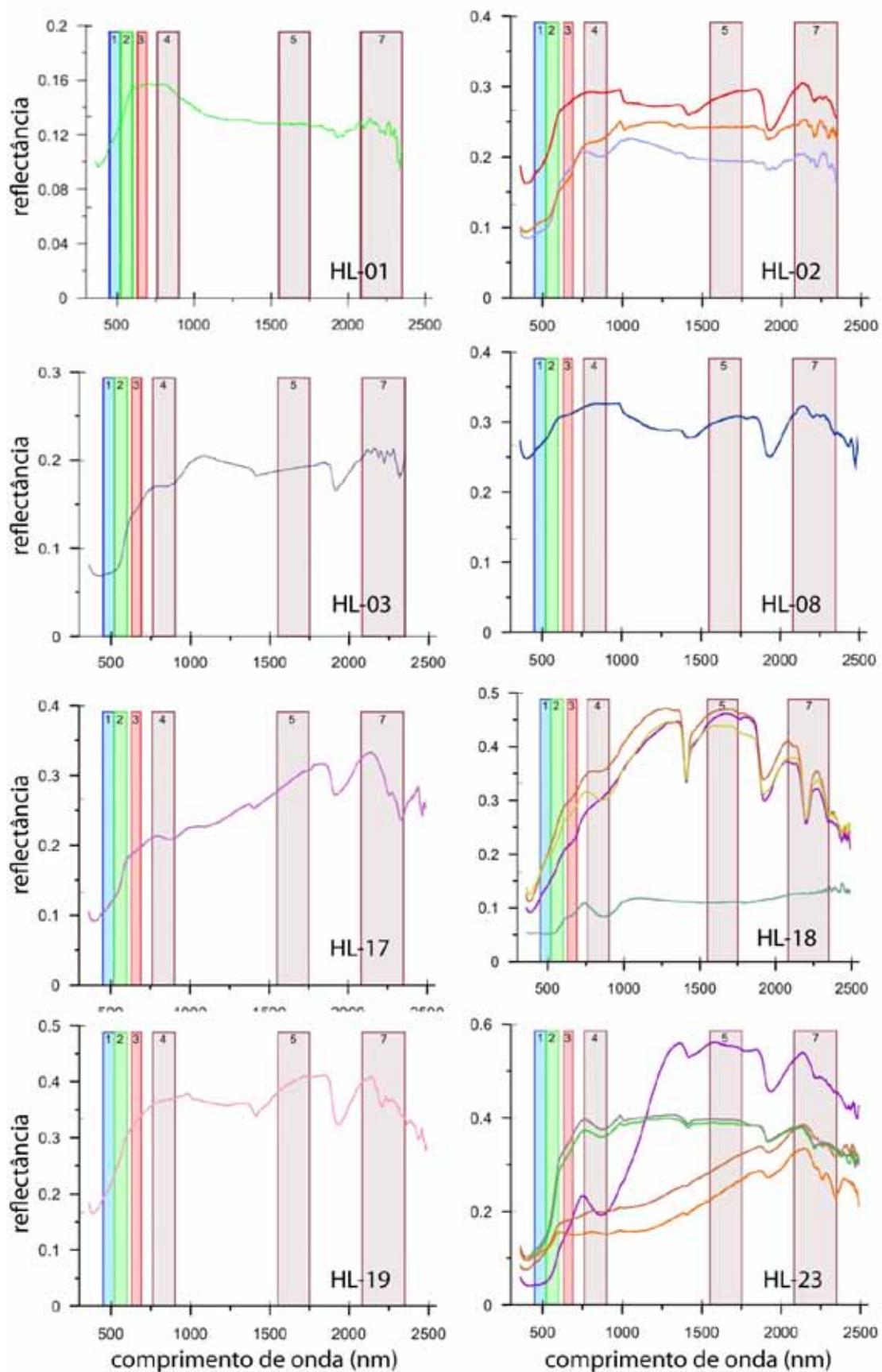
Óxidos de ferro e argilo-minerais ocorrem tanto na matriz como sobre os plagioclásios dos tufos e das rochas vulcânicas, sendo os primeiros responsáveis pela coloração avermelhada destas litologias. A sericita, em percentagens mais baixas, pode acompanhar estes óxidos e argilo-minerais e se concentra, preferencialmente, segundo as clivagens e planos de maclas dos plagioclásios.

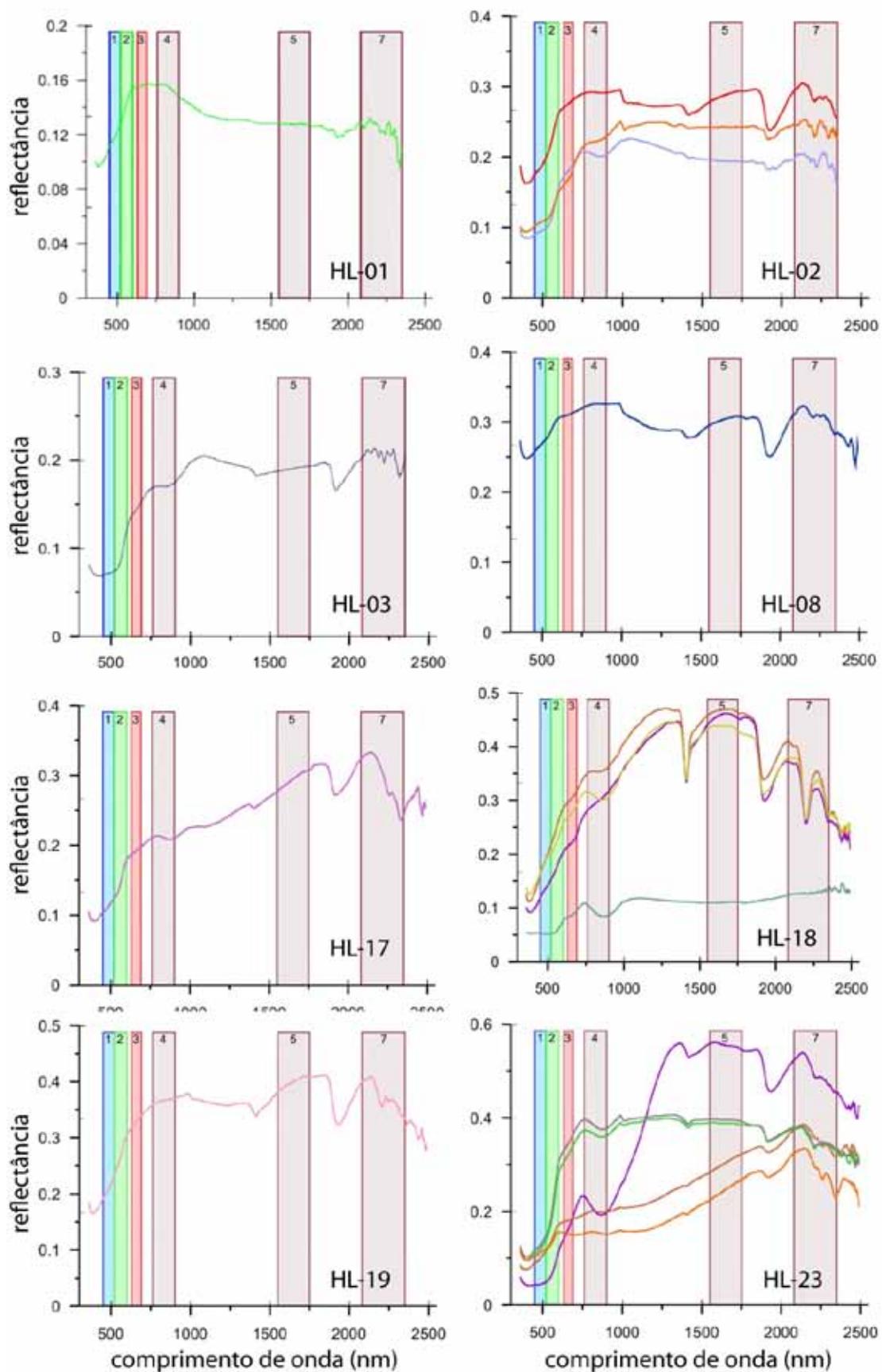
A alteração hidrotermal do tipo propilítica predomina nas rochas estudadas da área observando-se na região conhecida como Volta Grande, próxima ao contato com o Complexo Granítico Lavras, o anfibólio, óticamente classificado como actinolita, ocorre associado a epidoto e, por vezes, constituindo veios. Nardi (1984) reconheceu agregados de actinolita nas rochas propilitizadas do referido complexo. Este mineral foi descrito por John (1975) como componente principal nas zonas propilíticas internas dos depósitos do tipo cobre pórfiro em Bingham (Estados Unidos).

### **3.4 Espectrorradiometria**

Amostras representativas dos diversos alvos foram analisadas por espectrorradiometria a fim de se obter as curvas espectrais características de cada litotipo para posterior comparação e refinamento do método. As assinaturas espectrais das amostras analisadas foram plotadas no *software Grapher v. 2.0*. Para melhor visualização, as curvas foram suavizadas por uma média móvel de 10 medidas e são apresentadas a seguir juntamente com curvas espectrais de alguns dos minerais descritos para a alteração

hidrotermal do Bloco do Butiá obtidos na biblioteca espectral do USGS (*United States Geological Survey*) disponíveis no *software* ENVI. Essas assinaturas descrevem, ao longo do espectro eletromagnético, o intervalo espectral de absorção da radiação eletromagnética para um dado mineral. Neste sentido, essas assinaturas são utilizadas como guias de prospecção em imagens hiperespectrais quando, por meio de sistemas de classificação digital, é possível detectar essas anomalias mineralógicas.





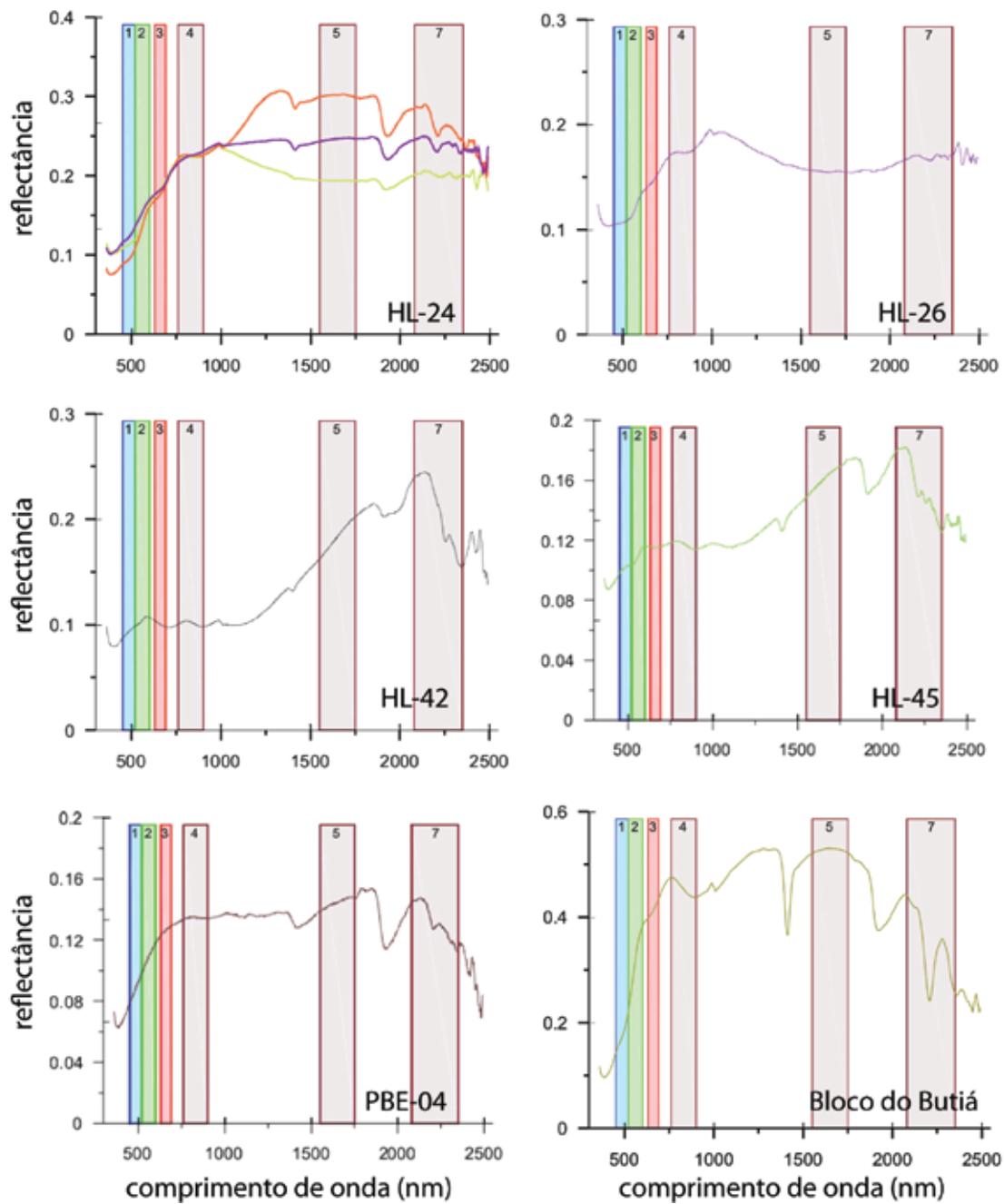


Figura 22: Curvas espectrais das amostras coletadas.

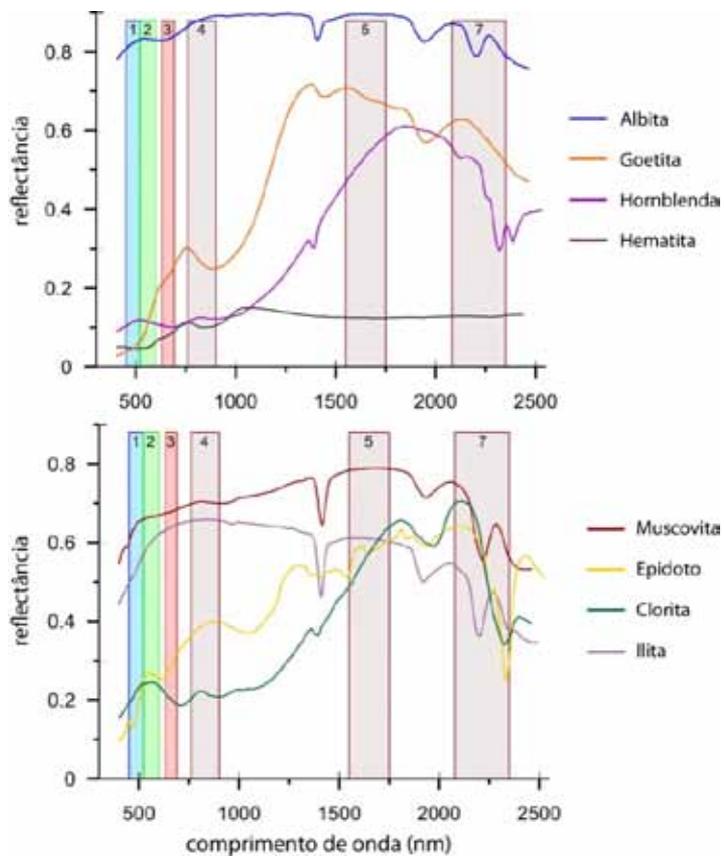


Figura 23: Curvas espectrais para alguns minerais descritos como produtos da alteração hidrotermal na ASLS (exceto hornblenda).

## 4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos foram atingidos, a integração entre os dados obtidos por sensoriamento remoto, o tratamento dos dados e a compilação de informações bibliográficas permitiram a identificação de áreas com padrões anômalos na região de Lavras do Sul.

Pode-se identificar com estes métodos áreas hidrotermalmente modificadas onde foram realizados estudos petrográficos para definição da mineralogia primária e secundária.

A definição de padrões e assinaturas espectrais das áreas hidrotermalizadas pode auxiliar na geração de um modelo prospectivo baseado em sensoriamento remoto.

A definição dos locais amostrados foi realizada por meio de imagem de sensoriamento remoto vinculada à cena 222/81 do sensor TM/Landsat-5 de 15/01/1986. Neste ano, de muito baixa pluviosidade, foi possível a identificação de feições espectrais singulares em uma área onde está situada uma antiga mina aurífera da região, o Bloco do Butiá, localizada 3 km à oeste da cidade de Lavras do Sul. Esta área foi selecionada como área piloto e utilizada como guia na interpretação dessa imagem por ter as zonas de alteração, paragêneses e estruturas já descritas na bibliografia. Diversos processamentos digitais da imagem, a partir do conjunto das seis bandas espectrais, geraram novas imagens que realçaram as anomalias espectrais vistoriadas em campo.

Das áreas visitadas em campo apenas três pontos não apresentaram algum sinal de antigos trabalhos de mineração tais como trincheiras, valas ou pilhas de rejeito. Foram eles os pontos HL-18, HL-24 e HL-43.

A integração dos resultados obtidos a partir da utilização das diversas ferramentas permitiu, portanto, a identificação de três áreas potenciais para estudos de prospecção mais apurados. A utilização de imagens de sensores com maior resolução espectral e espacial ou mesmo um refinamento dos processamentos aplicados, baseado nos resultados ora obtidos deverá

auxiliar na melhor delimitação destas áreas bem como na definição de um padrão espectral alvo com suas características. A soma de novas informações, como geoquímica e mineralogia das alterações identificadas, ajudará no refinamento do método visando a aplicações futuras em áreas semelhantes.

A comparação da curva espectral obtida para a amostra do Bloco do Butiá com as curvas da muscovita e illita, minerais descritos para esta alteração por Mexias (2000) permite o imediato reconhecimento das feições características de alvos com mineralogia similar (p.e.: HL-18). A integração das curvas características de clorita e epidoto permitem a associação desta mineralogia a todas as rochas vulcânicas e vulcanoclásticas descritas variando somente a intensidade dos picos e feições de absorção, condicionado pelo grau de alteração.

Uma análise sobre a abordagem escolhida para o tema faz perceber que a utilização de imagens de sensores orbitais em conjunto com outras ferramentas da geologia é praticável e pode trazer bons resultados. Contudo, fatores extrínsecos à geologia (p. e: cobertura vegetal) são fundamentais para uma abordagem integradora cujos resultados possam ser mensurados de forma mais exata, o que torna este um trabalho de caráter interdisciplinar.

Estudos preliminares utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura, em uma das áreas com sulfeto disseminado, permitiu a identificação e caracterização química (EDS) de pirita, calcopirita, arsenopirita e ouro. Esta associação mineral ocorre de forma disseminada sendo esta paragênese comum em mineralizações do tipo cobre-pórfiro, conforme observado por Nardi e Lima (1988), Mexias (2000) e Liz *et al* (2004).

A alteração hidrotermal do tipo propilítica predomina nas rochas estudadas da área. Esta é marcada pela associação epidoto, clorita, actinolita, carbonato em substituição de plagioclásio e biotita-hornblenda. A natureza metalumiosa das rochas da ASLS, marcada pela associação de minerais máficos primários do tipo biotita+hornblenda favorece a ocorrência deste tipo de alteração quando associada com fluidos de alta temperatura. A

alteração propilítica é bem marcado na região de Lavras do Sul conhecida como Volta Grande, próxima ao contato com o Complexo Granítico Lavras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, M.M., Mello, F.D. 1982. Jazida de Volta Grande. Relatório preliminar de pesquisa. Companhia Riograndense de Mineração, RS. Porto Alegre. 22p. Inédito.
- Barbosa, A. F.; Constantino, W. 1961. A Mineralização de Cobre de Volta Grande e Sua Relação com o granito de Lavras, Estado do Rio Grande do Sul, Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo. 10p.
- Berman, Y.U.S.; G.P. Volvarovich, A.L. Kazavinov. 1973. Mineralogical-geochemical characteristics of gold deposits developed at shallow depths *Int. Geol. Rev.*, 15 (1973), pp. 784–790.
- Bitencourt M.F. ,Gastal M.C.P., Kirchheim R.E., Costa K., Toledo F.A. 1993. Reavaliação preliminar das relações estratigráficas do Complexo Granítico Encruzilhada. *In: Simposio Internacional del Neoproterozoico-Cambrico de la Cuenca del Plata, I, La Paloma-Minas. Resúmenes Extensos*, 2: 1-6.
- Bitencourt M.F. e Nardi L.V.S. 2000. Tectonic Setting and Sources of Magmatism Related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Rev.Bras. Geoc.*, 30(1): 186-189.
- Bongiolo E.M., Mexias A.S., Santos J.O.S., Hartmann L.A., Conceição R.V., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L. 2003. Geocronologia do hidrotermalismo *versus* magmatismo do Distrito Aurífero de Lavras do Sul. *In: SBG, Encontro de Estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias*, 1, *Anais*. p. 83-88.
- Bongiolo, E. M., 2006. Integração de dados mineralógicos, isótopos estáveis (O, H) e porosidade de rochas (<sup>14</sup>C-PMMA) no reconhecimento da

evolução no sistema hidrotermal de Lavras do Sul/RS, Brasil. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 86 p.

Bongiolo E.M., Bongiolo D.E., Sardini P., Mexias A.S., Siitari-K M., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L. 2007. Quantification of porosity evolution from unaltered to propylitic-altered granites: The  $^{14}\text{C}$ -PMMA Method applied on the hydrothermal system of Lavras do Sul, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **79**: 503-517.

Bonin B., Azzouni-Sekkal A., Buss F., Ferrag S. 1998. Alkalic-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, **45**: 45-70.

Boyle, R.W., 1979. The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin 280, 564p.

Brito Neves B.B. e Cordani U.G. 1991. Tectonic Evolution of south america during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, **53**:23-40.

Burnham, C. W. 1979. Magmas and hydrothermal fluids H.L. Barnes (Ed.), Geochemistry of hydrothermal ore deposits, Wiley, New York (1979), pp. 71–136.

Carraro, C. C., Mexias, A. S. 2005. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 1757-1764.

Chaffee, M.A., 1982, A geochemical study of the Kalamazoo porphyry copper deposit, in Titley, S.R., ed., Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America: Tucson, Arizona, University of Arizona Press, p. 375-386.

Cottin J. Y., Lorand J. P., Agrinier P., Liégeois J.P., Bodinier J.L. 1998. Isotopic (O, Sr, Nd) and trace element geochemistry in the Laouni layered intrusions (Pan-African belt, Hoggar, Algeria): evidence for post-collisional tholeiitic magmas variably contaminated by continental crust. *Lithos*, (45): 197-222.

CPRM. 2009. Geobank: Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acesso em: março, 2009.

Crósta, Á. P., 1992. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, SP: IG/UNICAMP.

Cuddy, A.S., Kesler, S.E., 1982. Gold in the Granisle and Bell porphyry copper deposits, British Columbia, in Levinson, A.A., ed., Precious metals in the northern Cordillera: Rexdale, Ontario, Association of Exploration Geochemists, p. 157–172.

Deer, W.A., Howie, R.A. e Zussman, J. 1980. *An introduction to the rock-forming minerals*. London. Longman Group Limited. 528 p.

ENVI, 2000 - Guia do ENVI em Português. Sulsoft. Disponível em: [www.sulsoft.com.br](http://www.sulsoft.com.br). Acesso em: junho, 2009.

Ewart, A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesite-basalt compositional range. *In: Andesites: Orogenic Andesites and related rocks*. John Willey e Sons, New York, p.25-95.

Ferran, A. P. N. 1997. Classificação tipológica das jazidas auríferas do Escudo Brasileiro, Ano de Obtenção.

Fisher, R.V.; Schmincke, H.U. 1984. Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, Berlin, 472 pp.

- Fisher, R.V. 1966. Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth - Sci. Rev.* 1: 287-298.
- Gastal M.C.P., Ferreira F.J.F., Lafon J.M., Rolim S.B.A., Fialho C.F., Fernandes G.A. 2002. O sistema vulcano-plutônico de subsidência representado pelo complexo intrusivo Lavras do Sul, RS. *In: II Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Belém – PA, Anais*, p. 111.
- Gastal M.C.P., Ferreira F.J.F., Lafon J.M., Hartmann L.A. 2004. Monzodiorito Arroio do Jacques: Importância na evolução petrológica do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS. *In: SBGq, Congr. Bras. de Geol., 42, Anais, CD-ROOM, nº 23. p.1239*
- Gastal, M. C.; Lafon, J. M.; Fonseca, F. J.; Magro, F. U. S.; Remus, M. V. D.; Sommer, C. A., 2006. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 1: geologia, geofísica e geocronologia (207Pb/206Pb e 206Pb/238U). *Revista Brasileira de Geociências*, v.36, n.1, p. 99-113.
- Gastal, M. C. P. ; Lafon, J. M. . 1998.Gênese e evolução dos granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção oeste do escudo Sul-riograndense: geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. *Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 9-28.*
- Gastal M.C.P. e Lafon J.M. 2001. Novas Idades 207Pb/206Pb e Geoquímica Isotópica Nd-Sr para Granitóides Shoshoníticos e Alcalinos das Regiões de Lavras do Sul e Taquerembó, RS. *In: SBGq, Congr. Bras. de Geoqu. e I Simp. de Geoqu. dos Países do Mercosul, 8, Anais, CD-ROOM, RS 094, p.7.*

- Gastal M.C.P. e Lafon J.M. 2006.. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 2: química mineral, geoquímica e isótopos Pb-Sr-Nd. *Rev. Bras. de Geoc.*, **36**(1): 125-146.
- Gill, J.B. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Teconic*. New York. Springer-Verlag., 390p.
- Gõni, J.C. 1961. O Rapakivi Lavras: jazidas metalíferas associadas, Lavras do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Estudos preliminares. Gráfica URGS. 75p
- Hartmann, L. A. ; Nardi, L. V. S. ; Formoso, M. L. L. ; Remus, M. V. D. ; Lima, E. F.;Pierosan, R.; Mexias, A. S. 1999. Magmatism and Metallogeny in the Crustal Evolution of Rio Grande do Sul Shield, Brazil.. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, Porto Alegre, v. 26, n. 2, p. 45-63.
- Heithersay, P. S., Walshe, J. L. 1995. Endeavor 26 North: a porphyry copper-gold deposit in the Late Ordovician shoshonitic Goonumbla volcanic complex, New South Wales, Australia. *Econ. Geol.*, 90:1506-1532.
- Higgins, M.W. 1971. Cataclastic rocks: US Geol. Survey Prof. Paper 687. 97 p.
- Janikian, L. 2004. Seqüências deposicionais e evolução paleoambiental do Grupo Bom Jardim e da Formação Acampamento Velho, Supergrupo Camaquã, Rio GRande do Sul. Exame de qualificação (Doutorando em Geociências (Geoquímica e Geotectônica)) - Universidade de São Paulo.
- Kaul, P. F. T.; Zir Filho, J. A. Mineralizações Auríferas de Lavras do Sul: tipos, controle tectônico, aspectos genéticos e guias para a localização

de novos corpos mineralizados. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Porto Alegre, 1974. **Anais...** Porto Alegre, SBG.

Kushiro, I. 1975. On the nature of silicate melts and its significance in magma genesis: Regularities in the shift of the liquidus boundaries involving olivine, pyroxene, and silica minerals. *Am. J. Sci.*, **275**: 411-431.

Lickfold, V. 1999. Textural Characteristics of Porphyritic Intrusions Related to Cu-Au Mineralisation in the Endeavour 26 North and Endeavour 27 Deposits, Goonumbla, NSW, Australia. In: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy PACRIM '99, Bali, Anais, p. 255-262.

Liégeois J.P 1998. Preface — Some words on the post-collisional magmatismo. *Lithos*, **45**: xv–xvii.

Lima E.F. 1985. Petroquímica e Prospecção Litogeoquímica da Área da Merita, Região de Volta de Grande, Lavras do Sul, RS. CPG-UFRGS, Dissertação de mestrado, 187pp., inédito.

Lima, E. F. 1995. Petrologia das Rochas Vulcânicas e Hipabissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul ASLS, RS. Porto Alegre. 338p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Lima, E.F e Nardi, L.V.S. 1991. Os lamprófiros espessartíticos da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. *Geochim. Bras.*, **5**(1/2) :117-130.

Lima E.F. e Nardi L.V.S. 1998. The Lavras do Sul Shoshonitic Association: Implications for Origin and Evolution of Neoproterozoic Shoshonitic Magmatism in Southernmost Brazil. *Journal South American Earth Sciences*, **11**: 67-77.

- Leake, B.E. 1978. Nomenclature of anfiboles. *Can. Mineral.*, **16**: 501-520.
- Lindgren, W., 1933. *Mineral Deposits*, 4th ed., McGraw-Hill.
- Liz, J.D. de, Lima, E.F., Nardi, L.V.S., Hartmann, L.A., Gonçalves, C.R.H. 2004. Aspectos petrográficos, composicionais e potencialidade para mineralizações de ouro e sulfetos do sistema multi-intrusivo da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS). *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4), 539-552.
- Liz J.D, Lima E.F., Nardi L.V.S., Sommer C.A., Saldanha D.L., Pierosan R., Alexandre F.M. 2005. Caracterização geológica e petrologia das rochas monzoníticas da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS.). In: III Simpósio sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, Cabo Frio, *Anais*, CD-ROOM.
- Liz, J. D.; Lima, E. F.;Pierosan, Ronaldo;Lima, E. F. ; Nardi, L. V. Stoll; Soomer, C. A.; Saldanha, D. L. ; Pierosan, R. 2009. on line Petrologia e sucessão estratigráfica das rochas monzoníticas da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (RS). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39 (2), p. 244-255.
- Mexias A.S., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L., Meunier A. 1994. Considerações sobre a alteração hidrotermal da Área Bloco do Butiá (Complexo Granítico Lavras) Lavras do Sul - RS.. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1994, Camburiú - SC. *Boletim dos Resumos Expandidos*, 1:126-128.
- Mexias, A. S., 2000. Alteração hidrotermal e mineralização de ouro associada no Distrito de Lavras do Sul/RS - A área do Bloco do Butiá. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 360 p.

- Mexias A. S., Berger G., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L., Dani N., Frantz J.C., Bongioiolo E.M. 2005. Geochemical Modelling of Gold Precipitation Conditions in the Bloco do Butiá Mine, Lavras do Sul/ Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **77**(3): 717-729.
- Müller, D., Groves D. I. (eds.), 1997. Potassic Igneous Rocks and Associated Gold – Cooper Mineralization. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York, 240 p.
- Nardi, L.V. S. 1984. *Geochemistry and Petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brasil*. Londres, Universidade de Londres, Tese de Doutorado, 268 p. (inédito).
- Nardi L. V. S. e Lima E. F., 1985. A Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS. *Rev. Bras. Geol.*, 15(2):139-146.
- Nardi, L. V. S., Lima E. F., 1988. Hidrotermalismo no Complexo Granítico de Lavras e Vulcânicas Associadas, RS. *Rev. Bras. Geol.*, 18(3):369-375.
- Nardi L.V.S. e Lima E.F. 2000. O Magmatismo Shoshonítico e Alcalino da Bacia do Camaquã – RS. *In: M. Holz e L.F. De Ros (eds.) Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, RS, pp. 119-131.
- Pinheiro-Sommer, J.A. P., Lima, E. F., Saldanha, D. L., Sommer, C. A., Pierosan, R., 2006. O Uso de Imagens do Sensor Aster no Mapeamento de Unidades Vulcano-Sedimentares do Platô da Ramada, Vila Nova do Sul, RS. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, v. 33, p. 23-36.
- Porcher, C. A.; Lopes, R. C., 2000. Carta Geológica. Folha SH.22-Y-A, Cachoeira do Sul: escala 1:250.000. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Disponível em: [ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/pdf/csul/cachoeirasul\\_ctgeologica.pdf](ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/pdf/csul/cachoeirasul_ctgeologica.pdf)

- Ramgrab, G. E., 2000. Carta Metalogenética/Previsional. Folha SH.22-Y-A, Cachoeira do Sul: escala 1:250.000. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Disponível em:  
[ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/pdf/csul/cachoeirasul\\_ctmetalogenetica.pdf](ftp://ftp.cprm.gov.br/pub/pdf/csul/cachoeirasul_ctmetalogenetica.pdf)
- Remus, M. V. D., Hartmann L. A., Mcnaughton N. J., Groves D.I., Reischl J.L., 2000. Distal magmatic-hydrothermal origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) deposits, southern Brazil. *Gondwana Research*, 3 (2):155-174.
- Reischl, J.L. 1980. Mineralizações auríferas associadas ao Complexo Granítico Lavras do Sul, RS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32; 1980, Cambuí. Anais... Cambuí, SBG, v. 3 p. 1700-1712.
- Ribeiro, M.; Bocchi, P.A; Figueiredo F.P.M. e Tessari, R.I. 1966. Geologia do Quadrícula de Caçapava do Sul, RS. *Bol. Div. Fom. Prod. Min.*, Rio de Janeiro, DNPM, **127**: 1-232.
- Robertson, J.F. 1966. Revision of the stratigraphy and nomenclature of rocks units in the Caçapava - Lavras Region. State of Rio Grande do Sul, Brasil. *Notas e estudos da Escola de Geologia*, Porto Alegre, UFRGS, **1**: (2): 41-54.
- Rock, N.M.S. 1987. The nature and origin of lamprophyres: an overview. In: J.G.Fitton e G. Upton (Eds.), *Alkaline Igneous Rocks*, Geol. Soc. Spec. Publication, p. 191-226.
- Rose, A.W.; Burt, D.M. 1979. Hydrothermal Alteration. In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Barnes, H.L., ed.), John Wiley e Sons (2<sup>nd</sup> ed.): 173-235 pg.
- Senhorinho, M. O. 2009. Uso do Sensoriamento Remoto na Identificação de Áreas com Alteração Hidrotermal na Região de Lavras do Sul, RS. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Geologia) -

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul. Orientador: Evandro Fernandes de Lima.

Streckeisen, A. 1979. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. *Geology*, **7**.

Swanson, S.E. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic textures. *Am. Mineral.*, **62**: 966-978.

Teixeira, E.A e Leinz, V. 1942. Ouro no Bloco do Butiá. Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral, DNPM, 50,p.81

Tsuchiyama, A. e Takahashi, E 1983. Melting kinetics of a plagioclase feldspar. *Contrib. Min. Petrol.*, **84**:345-354.

White, N.C., and Herrington, R.J., 2000. Mineral deposits associated with volcanism, in Sigurdsson, H, eds., *Encyclopedia of volcanoes*: San Diego, Academic Press, p. 897–912

Wildner, W.; Lima, E. F.;Pierosan, Ronaldo, 1992. Considerações sobre os depósitos vulcanogênicos do Grupo Bom Jardim nas regiões de Lavras do Sul e Caçapava do Sul, RS.(Apresentação de Trabalho/Seminário).