

**UNICAMP**

**UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas**

**IG - Instituto de Geociências**



GE 001 – Trabalho de Conclusão de Curso

Coordenador: Roberto Perez Xavier

Lilian Pimentel Diniz dos Santos

**Estudo da Alteração Hidrotermal dos Depósitos Auríferos de Pitangui,  
MG – Utilizando Espectroscopia de Reflectância, Sensoriamento  
Remoto Multiespectral e Aerogeofísica.**

Orientador: Alvaro Penteado Crósta

Co-Orientador: Roberto Perez Xavier

Campinas, julho de 2011

À minha mãe Lina Rosa e  
minhas irmãs Denise e  
Débora, eternamente  
importantes!

## Agradecimentos

Ao longo de toda a caminhada me que trouxe até aqui foram muitas as pessoas importantes, gostaria de me lembrar de cada uma e agradecer, mas pode ser que a página seja pequena para tanto...

Agradecer a toda a família Rezende Diniz é totalizar e confirmar a importância que cada um dos meus avós, tios e primos tiveram ao longo de tantos anos, é uma honra ser parte desta maravilhosa família! Minha mãe e minhas irmãs, sem dúvida as mulheres mais importantes na minha vida. A elas agradeço por tudo que sou e que consegui conquistar, obrigada pelo apoio, conselhos e broncas.

Obrigada também a família Oliveira Lara, Marisa, Dr. Renato, Bárbara e Renato. Acredito que saibam o quão importante foi a atuação e contribuição de vocês neste surpreendente caminho!

As minhas amigas e amigos e professores da E.E. Fernando Otávio que moldaram e ensinaram muito do que sei hoje. Iolanda, Biane, Cristina, Marina, Mateus, Thiago, Lissandra, M. Arminda, Neide, M. César e tantos inesquecíveis. Aos outros amigos de Pará de Minas, do clube, da natação, os vizinhos os amigos das minhas irmãs que acabavam amigos de todas três!

Àqueles inesquecíveis amigos dos últimos anos, alguns que são como irmãos, Sara e Felipe, minha mãezota Mi, a minha esposinha Becca, minhas queridas marelãs: Nate, Vanessão, Pam, às Marianas, Elenita, Dri, Laila, e cleidianos. Joziz, Jeandrinho, Dani, Ka, Gabis, Ju, Fiiiiii e Bu, alguns mais presentes no início outros no fim destes cinco anos de convivência, vocês fizeram os meus dias mais felizes...

Obrigadas aos meus veteranos da geografia e geologia que apoiaram, ajudaram e ameaçaram bastante nesse tempo! E aos bixos que tornaram possível a fundação e cuidam até hoje da Terræ Jr.

Lobão e Tici obrigada pelo apoio em todos os sentidos, que me deram nos últimos anos, vocês são demais!

Vaz, além de um professor, um chefe e grande amigo, obrigada pelas oportunidades e amizade!

À todos os professores, funcionários e demais colaboradores da Unicamp, em especial aos do Instituto de Geociências.

Hoje enfim sou Geóloga e uma nova caminhada começa, que venha o próximo capítulo!

## RESUMO

Foram avaliadas neste estudo técnicas exploratórias para a caracterização da alteração hidrotermal da região dos depósitos auríferos do Projeto Turmalina em Pitangui, Minas Gerais. O trabalho abrangeu análises por espectroscopia de reflectância de amostras de solo e rochas com alteração hidrotermal, sensoriamento remoto multiespectral e aerogeofísica.

Os dados espectrais obtidos através de reflectância espectral foram utilizados na caracterização mineralógica da alteração hidrotermal, relacionada à formação deste depósito, na avaliação da distribuição espacial e comportamento das assembleias mineralógicas hidrotermais em superfície. Os espectros de reflectância do conjunto de amostras foram analisado qualitativamente nas faixas do espectro eletromagnético (EEM) correspondentes ao visível (Vis), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). Nestas porções do EEM é possível analisar a composição mineralógica e cristalinidade dos materiais, através dos picos de absorção de energia.

As imagens orbitais multiespectrais do sensor ASTER foram analisadas com o intuito de identificar as assembleias de minerais de alteração hidrotermal, abrangendo a área do depósito e o seu entorno.

Aos dados de gamaespectroscopia foram aplicadas técnicas de processamento com o objetivo de caracterizar o comportamento dos radioelementos nos depósitos da região de Pitangui. Os objetivos de cada método consistem em evidenciar as concentrações anômalas de potássio (Kd) e de potássio e urânio (Fator F), sendo que a concentração de tório é utilizada como parâmetro de normalização. Os dados magnetométricos foram utilizados com o objetivo de mapear estruturas profundas, visto o ambiente colisional em que se encontram os depósitos auríferos estudados.

O conjunto de corpos mineralizados que formam o Projeto Turmalina encontra-se associado a xistos, filitos, formações ferríferas bandadas e tufos do Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana. Estas rochas se configuram como uma faixa alongada que se estende de sudeste para noroeste.

Os principais minerais encontrados foram biotita, clorita, sericita, muscovita, caulinita, esmectita e óxidos de ferro. O principal óxido de ferro identificado foi a goethita, comum em solos tropicais e que confere cor amarelada às rochas alteradas, típica dos hidrotermalitos, como são chamados os corpos de minério oxidado da região.

A utilização de sensoriamento remoto mostrou-se pouco relevante para a caracterização composicional e espacial do depósito. Contudo, a partir das imagens ASTER foram identificados os principais lineamentos da região, até então não mapeados neste nível de detalhe.

A partir dos dados magnéticos foram mapeadas as estruturas principais e mais profundas. Os dados gamaespectrométricos, por sua vez, revelaram o comportamento anômalo deste depósito em relação aos clássicos depósitos tipo “lode”, pois apresentam baixas concentrações de potássio e urânio que possivelmente refletem diretamente a composição do fluido hidrotermal.

# CONTEÚDO

<b>RESUMO</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1 OBJETIVOS .....	8
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	8
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	10
1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E CLIMÁTICOS .....	11
<b>CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	13
2.2 GEOLOGIA LOCAL .....	15
2.2.1 <i>Embasamento Cratônico</i> .....	16
2.2.2 <i>Grupo Nova Lima</i> .....	17
2.2.5 <i>Rochas intrusivas</i> .....	19
2.2.6 <i>Coberturas Sedimentares</i> .....	20
2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL E TECTÔNICA.....	20
2.4 MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS .....	21
2.4.1 <i>Pontal</i> .....	22
2.4.2 <i>Faina</i> .....	22
2.4.3 <i>Satinoco</i> .....	23
2.4.4 <i>Turmalina</i> .....	24
2.4.5 <i>Fazenda Experimental</i> .....	24
<b>CAPÍTULO 3 – SENSORIAMENTO REMOTO MULTIESPECTRAL</b> .....	<b>25</b>
3.1 SENSOR ASTER .....	26
3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO.....	27
3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....	30
3.4 FOTOINTERPRETAÇÃO.....	34
<b>CAPÍTULO 4 – AEROGEOFÍSICA</b> .....	<b>35</b>
4.1 DADOS GAMAESPECTOMÉTRICOS E MAGNETOMÉTRICOS.....	36
4.2 MAGNETOMETRIA.....	37
4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.4 GAMAESPECTROMETRIA .....	39
4.5 PROCESSAMENTO DE DADOS E DISCUSSÕES .....	42
<b>CAPÍTULO 5 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ESPECTRAIS</b> .....	<b>47</b>
5.1 PROCESSAMENTOS DOS DADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1.1 <i>Pontal</i> .....	49
5.1.2 <i>Faina</i> .....	50
5.1.3 <i>Morro da Turmalina</i> .....	51
• <i>Corpo A</i> .....	51
• <i>Corpo B</i> .....	53
5.1.4 <i>Fazenda Experimental</i> .....	54

<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

## CAPÍTULO 1 – ASPECTOS GERAIS

Os depósitos auríferos do Quadrilátero Ferrífero são conhecidos desde o século XVII, quando teve início o ciclo do ouro no Brasil. O Projeto Turmalina, na região no município de Pitangui, engloba os depósitos auríferos de Faina, Morro da Turmalina, Pontal, Satinoco e Fazenda Experimental, e atualmente pertencem à Mineração Turmalina – Jaguar Mining.

As rochas do *greenstone belt* Rio das Velhas que hospedam estes depósitos ocorrem como uma faixa alongada na direção sudeste-noroeste. Os depósitos são classificados como “lode” orogénico, embora alguma influência de fluidos vulcânicos não seja descartada.

Diferentes métodos para caracterização e identificação de depósitos minerais foram utilizados neste trabalho, incluindo a espectroscopia de refletância, o sensoriamento remoto multiespectral e a aerogeofísica.

A espectroscopia de refletância utiliza os picos de absorção de energia eletromagnética, 350nm a 2500 nm, para caracterização qualitativa e quantitativa dos componentes minerais nas amostras analisadas. Desta forma é possível conhecer as assembleias minerais das rochas da área de estudo, podendo-se estabelecer as principais diferenças entre minério e estéril, bem como registrar a variação espacial dos processos de alteração hidrotermal presentes.

O processamento das imagens ASTER pelo método de análise de principais componentes (APC) proposto por Loughlin (1991), possibilita a definição da distribuição espacial dos minerais em superfície. Devido à capacidade do método em identificar os principais minerais de alteração e sua distribuição, ele tem sido amplamente utilizado para caracterização de alteração hidrotermal e supergênica de depósitos minerais.

Gamaespectrometria e magnetometria correspondem aos dados aerogeofísicos utilizados no presente projeto. Pires (1995) e Quadros (2003) atestam a capacidade dos métodos gamaespectrométricos para a detecção de processos de alteração hidrotermal, baseada no enriquecimento em K<sub>40</sub> proveniente dos fluidos hidrotermais. A magnetometria tem por objetivo identificar os elementos de maior susceptibilidade magnética. Além disso, alguns tipos de rocha, juntamente com estruturas geológicas profundas, são comumente detectadas por este método.

Os depósitos de ouro do Projeto Turmalina associam-se a diferentes processos de alteração hidrotermal. A caracterização da distribuição espacial dos minerais provenientes de alteração hidrotermal é importante pois permite conhecer melhor as características dos

depósitos e seu processo de formação, além de abrir possíveis precedentes para outros prospectos minerais.

### ***1.1 Objetivos***

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) contempla a integração de métodos diretos e indiretos de investigação geológica, com o objetivo de identificar e caracterizar os depósitos auríferos região de Pitangui – MG. A partir do estudo da distribuição dos minerais hidrotermais e da caracterização de seus processos de geração é possível identificar os principais fatores que atuaram no processo de formação das mineralizações auríferas e assim gerar dados para uma melhor definição do modelo genético.

### ***1.2 Materiais e Métodos***

A etapa de análise abrangeu o uso de três métodos principais: a aerogeofísica, a espectroscopia de reflectância e o sensoriamento remoto multiespectral. Os dados aerogeofísicos, de gamaespectrometria e magnetometria, foram utilizados com a finalidade de identificar anomalias positivas de potássio e magnéticas, respectivamente, devido à associação do minério com rochas com alto teor de potássio e/ou com formações ferríferas. A espectroscopia de reflectância foi utilizada com o intuito de identificar e caracterizar os minerais presentes em amostras geológicas das zonas de alteração hidrotermal. Já o sensoriamento remoto foi utilizado na identificação de estruturas, contatos geológicos e distribuição espacial dos principais minerais de alteração.

As amostras analisadas neste estudo foram coletadas pela autora por meio de amostragem de campo e perfazem cerca de 43 amostras. Foram coletadas amostras de solo e rocha na superfície dos depósitos; nos depósitos em que o minério superficial foi completamente extraído, a amostragem foi realizada por meio de testemunhos de sondagens e da galeria de desenvolvimento da mina de subsolo. O trabalho foi desenvolvido por meio das seguintes etapas:

- Aquisição e leitura da bibliografia;
- Trabalho de campo para coleta de amostras para espectroscopia e reconhecimento da área de estudo;
- Processamento e análise dos dados de sensoriamento remoto multiespectral;
- Fotointerpretação;
- Processamento e análise dos dados geofísicos;



- Espectroscopia de reflectância, abrangendo a medida dos espectros das amostras em laboratório e a identificação dos minerais a partir da correlação com dados da biblioteca espectral do USGS (United States Geological Survey).
- Integração dos dados e conclusões

### **1.2.1 Equipamentos**

Os seguintes equipamentos serão empregados no desenvolvimento do projeto:

- Espectroradiômetro modelo *FieldSpec 3 High Resolution*, fabricado pela Analytical Spectral Devices Inc. (ASDI), pertencente ao Laboratório de Espectroscopia de Refletância (LER) do Instituto de Geociências da Unicamp .
- Computadores para o processamento digital das imagens de sensoriamento remoto dos sensores ASTER e dos dados aerogeofísicos.

### **1.2.2 Base de dados**

- Imagem do sensor orbital ASTER (multiespectral), cobrindo as regiões do visível infravermelho próximo (VNIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR) do espectro eletromagnético, em 14 bandas espectrais, com resolução espacial respectivamente de 15, 30 e 90 metros, adquiridos da NASA.
- Base de dados digital de gamaespectroscopia e magnetometria, com espaçamento de linhas de vôo de 250 m da área 2 Relativa ao sobrevoo realizado entre agosto e novembro de 2000 no Projeto de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, cedidos pela Codemig (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais).

### **1.2.3 Aplicativos de software**

- Programas de processamento digital de imagens: ENVI® (RSI);
- Programas para análise dos dados de espectroscopia de reflectância: SIMIS® FeatureSearch 1.6 e ENVI® (RSI);
- Programa de processamento de dados aerogeofísicos: Geosoft Oasis Montaj®
- Programas para integração de dados em ambiente SIG - Sistema de Informação Georeferenciadas: ArcMap® 9.3(ESRI) e Arc-GIS® 9.0 (ESRI).

### 1.3 Localização da Área

A localização dos corpos mineralizados, denominados Projeto Turmalina, e as instalações da planta de beneficiamento pertencem ao município de Conceição do Pará, na região centro-noroeste de Minas Gerais. A área abrange também os municípios de Pitangui e Onça do Pitangui, totalizando 5300 hectares (Figura 1.1).

O acesso a partir do centro de Belo Horizonte (MG) é feito pela Rodovia Federal BR-381 no sentido de São Paulo (SP). Depois de percorridos cerca de 40 km, entra-se na BR 262 (sentido Triângulo Mineiro), percorrendo-se mais 80,5 km até o trevo com a MG 423 (35,5 km após trevo de Pará de Minas) que dá acesso a Conceição do Pará e Pitangui. Percorre-se mais 19,5 km, passando pela cidade de Conceição do Pará, totalizando 140 km. Os municípios de Conceição do Pará e Pitangui estão localizados a 4 km e 6 km da área de estudo, respectivamente.



Figura 1.1: Localização da área de estudo – polígono verde.

#### ***1.4 Aspectos Fisiográficos e Climáticos***

A geomorfologia da região, segundo o conceito de King (1957), consiste em topos aplainados evidenciados pelas serras quartzíticas mais elevadas. A superfície de aplainamento foi quase que inteiramente retrabalhada pelo Ciclo Velhas, restando como única testemunha, o Plateau de Pitangui, ao norte da Serra dos Ferreiras. Esta unidade geomorfológica foi denominada como Planaltos Dissecados do Centro-Sul e Leste de Minas

O clima é do tipo Cwa, segundo a classificação Köppen-Geiger, ou seja, tropical de altitude, mesotérmico de verão chuvoso e quente, com temperatura média anual variando de 16,5°C no mês de julho a 23°C no mês de dezembro. A evaporação não oscila muito ao longo do ano, sendo abril o mês de mais baixo valor (60 mm) e agosto o mês de maior evaporação (110 mm). A umidade relativa do ar também varia pouco durante o ano, com média anual em torno de 70%.

A vegetação predominante é do tipo cerrado de porte médio e floresta perenifólia a subcaducifólias, podendo ser encontradas matas ciliares nas nascentes e em cursos de rios. A outra parte da vegetação está representada por pastagens e por vegetação secundária, ou seja, remanescente, em fases diversas de crescimento.

A área em estudo situa-se na bacia hidrográfica do rio São Francisco, sub-bacia do rio Pará, afluente em sua margem direita. Os cursos d'água tributários mais importantes são os rios São João, Itapeçerica do Peixe, ao norte de Pitangui.

Os solos característicos da região e de maior ocorrência na área são classificados como Latossolo Vermelho Escuro eutrófico - LEE e/ou Cambissolo Eutrófico - Ce, além dos Litossolos - LT. A maior parte do Latossolo Vermelho Escuro eutrófico é originada de sedimentos argilosos de rochas metamórficas, através do retrabalhamento dos filitos e de rochas metavulcânicas, normalmente ocupado pelo cerrado tropical subcaducifólio que é a vegetação predominante. Os Cambissolos eutróficos aparecendo associados aos solos litólicos eutróficos, ambos de textura argilosa e fase pedregosa desenvolvidos do substrato de rochas quartzosas. São mais utilizados com pastagens cultivadas.

## CAPÍTULO 2 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

Os depósitos auríferos da porção central do estado de Minas Gerais são conhecidos desde o século XVII e são hospedados pelo Supergrupo Rio das Velhas. Os primeiros estudos publicados desta região datam do século XIX, com Eschwege, Gorceix e Derby, mas somente no início do século XX, por meio de um acordo do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), foram produzidos mapas de detalhe do Quadrilátero Ferrífero (Vieira 1988).

A região de Pitangui, apesar de bastante próxima ao Quadrilátero Ferrífero, não foi incluída nos estudos daquela ocasião. Contudo, a partir da década de 70, tornou-se alvo de interesse econômico devido à descoberta dos depósitos de ouro primários hospedados em rochas do Grupo Nova Lima, porção basal do Supergrupo Rio das Velhas, semelhantes aos depósitos do Quadrilátero Ferrífero (Romano 2007).

Dentre os tipos de mineralizações auríferas do Quadrilátero Ferrífero as jazidas do Projeto Turmalina são classificadas como: zonas silicificadas dentro de zonas de cisalhamento que hospedam sulfeto maciço ou disseminado, a mineralização aurífera é proporcional ao grau de silicificação, sendo que concentrações de biotita e sericita são geralmente bons indicadores minerais. O ouro pode ocorrer livre ou associado à arsenopirita, pirrotita e pirita (RPA Turmalina). Existem atualmente três hipóteses para a gênese das mineralizações, descritas abaixo segundo os estudos de Takai *et al* (1990).

A primeira hipótese é que depósitos do Pontal, Faina e Satinoco são epigenéticos formados através de soluções hidrotermais e que o Morro da Turmalina é do tipo exalativo pelo seu formato estratiforme e rara presença de carbonato.

A segunda hipótese situa a época da mineralização concomitante à da formação das rochas vulcanoclásticas do Pontal, Unidade Metavulcano-sedimentar, com soluções mineralizantes percolando nestas rochas e nas unidades inferiores.

A terceira hipótese relaciona o processo de concentração do ouro ao surgimento de uma zona de cisalhamento de direção NW, que permitiu a passagem de soluções hidrotermais em mais de um pulso, que alteraram as diferentes encaixantes com processos de sericitização, carbonatação e silicificação acompanhado de sulfetação e finalmente a precipitação do ouro.

Romano (1989, 1993a) e Teixeira & Kuyumjian (1991) propuseram os mecanismo stipo *hot spring*, alteração hidrotermal pós-vulcânica, ou ainda de fluidos derivados da

granitogênese tardi-arqueana para aquela região. No entanto, feições indicativas desses processos são praticamente ausentes ou restritas a poucos locais.

A hipótese da alteração hidrotermal concomitantemente com a instalação de uma zona de cisalhamento é a que tem aceitação mais ampla atualmente, principalmente após os trabalhos de Heineck (1997) e Romano & Paiva (1997). Esta hipótese está de acordo com o caráter colisional da bacia de sedimentação do Supergrupo Rio das Velhas na região. A desidratação da pilha vulcano-sedimentar durante o encurtamento crustal seria responsável pela produção da enorme quantidade de fluidos hidrotermais responsáveis pela alteração das rochas (Takai *et al* 1990; Romano 2007).

Esta idéia de gênese encontra apoio no paralelismo de outra zona de cisalhamento de direção NW, onde se encontram as antigas catas de quartzo enfumaçado do lineamento Pitangui, na unidade de topo da sequência do tipo greenstone belt que ali ocorre.

Ebert (1997) reitera a hipótese de gênese ligada à instalação das zonas de cisalhamento e interpreta estes depósitos como tipo lode mesothermal. O controle do depósito é estrutural e a geometria dos corpos de minério apresenta-se como camadas concordantes com a direção de deformação regional. Este autor salienta ainda que os veios de quartzo relacionam-se à tectônica tardia, pois apesar de concordantes com a foliação e afetados por crenulação eles não estão tão intensamente cisalhados como as rochas encaixantes.

Para Romano (2007) o principal problema deste modelo genético relaciona-se à certa contemporaneidade da instalação da zona de cisalhamento e do vulcanismo, isto é, se há contribuição de fluidos pós-vulcânicos no processo de alteração. Contudo não há comprovação para esta hipótese, fazendo-se necessária a datação com marcadores geocronológicos confiáveis, o que até o presente não foi feito.

## ***2.1 Contexto Geológico Regional***

A região do município de Pitangui está situada no domínio meridional do Cráton São Francisco (Almeida 1977). Os complexos gnáissico-migmatíticos Divinópolis e Belo Horizonte, o Super Grupo Rio das Velhas e a Suíte intrusiva Mato Dentro perfazem as unidades arqueanas que ocorrem na região. O Grupo Bambuí, neoproterozóico, e as coberturas sedimentares cenozóicas recobrem parte daquelas unidades (Tabela 2.1) (Alkmim & Marshak, 1998; Romano 2007; Romano 1993a; CPRM 2011).

O embasamento cratônico é caracterizado por dois compartimentos o Complexo Divinópolis, a sul, e o complexo Belo Horizonte, a norte, este último notavelmente mais cisalhado que o primeiro (Menezes Filho *et al* 1977).

O Supergrupo Rio das Velhas caracteriza-se por uma sequência vulcano-sedimentar do tipo *greenstone belt* desenvolvida em uma bacia oceânica entre 3029±6 Ma e 2700±1 Ma, datação U-Pb (Geobank, CPRM 2011). Esta bacia separava os blocos crustais Belo Horizonte e Divinópolis e a posterior colisão destes blocos conferiu às rochas formadas nesta bacia uma forte orientação noroeste-sudeste (Noce *et al* 1997). Os grupos Maquiné e Nova Lima correspondem respectivamente às unidades superior e inferior deste supergrupo (Ebert 1997; Romano 2007).

O Grupo Maquiné, ainda sem dados de datação direta, representa uma sequência tipicamente molássica com espessura média de 1000 m. Este grupo é subdividido em Formação Casa Forte (topo) constituída por quartzitos sericíticos, cloríticos a xistosos e filitos; e Formação Palmital (base) composta por quartzitos impuros e conglomerados oligomíticos (Gair, 1962; Romano 1993a).

O Grupo Nova Lima é composto pelas unidades Metavulcano-sedimentar e Metassedimentar (topo), e Metaígneia e Metassedimentar (base), datadas em 3029±6 Ma e 2776±6 Ma, respectivamente, pelo método U-PB (Geobank, CPRM 2011).

A Suíte Intrusiva Mato Dentro caracteriza-se por granitóides biotíticos de grãos grossos a médios, datados por Romano (1989) em 2.755±14 Ma pelo método U-Pb. Estes corpos sin a tardi tectônicos possuem forma amendoada e estão alinhados na direção noroeste-sudeste (Romano 2007).

O Grupo Bambuí é composto por uma sequência de rochas carbonáticas e terrígenas que recobrem parte do Cráton São Francisco. Datações pelos métodos K-Ar em argilas sugerem idades entre 662 e 478 Ma para a sedimentação destas rochas. Este grupo compreende da base para o topo as formações Carrancas (glaciogênica), Sete Lagoas (carbonática), Serra de Santa Helena (pelito-carbonática), Lagoa do Jacaré (carbonática), Serra da Saudade (pelítica) e Três Marias (psamítica) (Babinsk *et al* 1999; Martínez 2007, Sgarbi *et al* 2003).

Coberturas aluvionares terciárias e quaternárias encontram-se depositadas nas calhas dos cursos de drenagem mais volumosos. Estes sedimentos, que incluem cascalhos, areias e argilas inconsolidados, terraços aluvionares lateríticos semiconsolidados e com grande quantidade de blocos e seixos rolados, são lavrados para extração de ouro ou fabricação de cerâmica vermelha (Romano 2007).

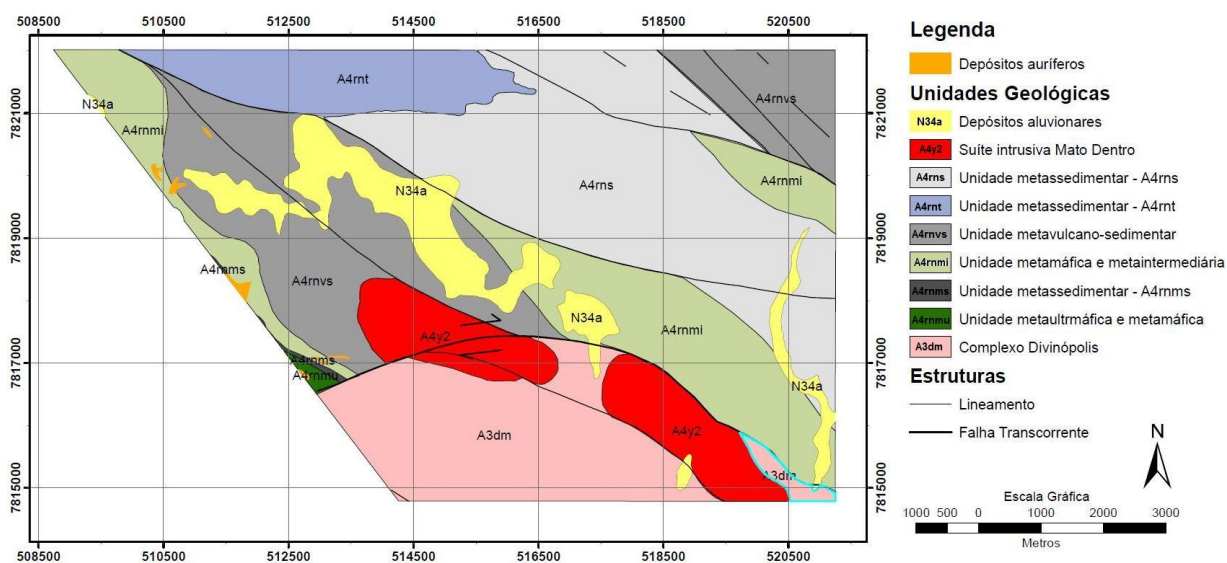
Tabela 2.1: Coluna litoestratigráfica proposta para a região de Pitangui (adaptada de Romano 2007).

COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA				
FANEROZÓICO	NEÓGENO	<u>Quaternário</u> : Aluviões e terraços aluvionares		
		<u>Terciário-Quaternário</u> : Leques coluvionares limoníticos e eluviões detrito-lateríticos		
PROTEROZÓICO	NEOPROTEROZÓICO	GRUPO BAMBUÍ	<u>Formação Serra de Santa Helena</u> : Siltito ardoso cinzento, margas calcíticas; Arenito subarcosiano.	
			<u>Formação Sete Lagoas</u> : Dololuto cinza claro com níveis silicosos e calcíticos; Dololuto e calciluto brancos, cinza e róseo com nódulos de chert e filito clorítico; Calcário e margas indiferenciados.	
			<u>Formação Carrancas</u> : Varvito, diamictito Arenito grauvaquiano, arenito com concreções ferruginosas Arcósio e subarcósio de matriz clorítica	
ARQUEANO	NEOARQUEANO	SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	Suite Granitóide Intrusiva sin a tardi-tectônica de Mato Dentro U-Pb 2.755 (+14 -13 Ma)	
			GRUPO MAQUINÉ	Quartzitos, quartzito micáceo, micaxisto, níveis filíticos e de conglomerados oligomíticos a polimíticos;
			GRUPO NOVA LIMA	<b>SEQÜÊNCIA METAVULCANO-SEDIMENTAR E METASSEDIMENTAR</b>
				<u>Unidade metassedimentar</u> : filito muscovítico e clorítico, metaturbiditos, quartzitos, metachert puro a ferruginoso, filito carbonoso, níveis vulcanoclasticos;
				<u>Unidade de rochas hidrotermalmente alteradas</u> : rochas peraluminosas (agalmatolito) com quartzo, pirofilita, diásporo, coríndon, polimorfos Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> , cloritóide, muscovita, caulinita, derivadas de metassedimentos e metavulcânicas;
				<u>Unidade metavulcano-sedimentar</u> : rochas metapiroclásticas e metatufos re-sedimentados, metarritmito e metagrauvaca e metassedimentos associados;
				<b>SEQÜÊNCIA METAÍGNEA E METASSEDIMENTAR</b>
				<u>Unidade metamáfica e metaintermediária</u> : rochas metavulcânicas básica e intermediária;
				<u>Unidade metassedimentar</u> : metachert puro e ferruginoso, filito muscovítico, filito carbonoso, magnetitito, camadas carbonáticas, silicificadas e sulfetadas;
			<u>Unidade metaultramáfica e metamáfica</u> : serpentinito, clorita, anfibólio e talcoxistos;	
<b>EMBASAMENTO CRATÔNICO</b>				
Complexo Divinópolis – ortognaisses miloníticos a protomiloníticos diversos e migmatitos				
Complexo Belo Horizonte – ortognaisses e migmatitos				
<b>ROCHAS DE POSICIONAMENTO INDETERMINADO DO ARQUEANO AO NEOPROTEROZÓICO</b>				
anfíbolito, metagabro, metamáfica, serpentinito, gabro e gabro porfírico, episenito, quartzo hidrotermal, kimberlito.				

## 2.2 Geologia Local

A geologia da área de estudo baseia-se nos relatórios internos das empresas Mineração Morro Velho Ltda., Unigeo Geologia e Mineração Ltda. e Mineração Turmalina Ltda., bem como na revisão proposta por Romano (2007) para a geologia da região (Figura 2.1).

As quatro jazidas do Projeto Turmalina são hospedadas por uma sequência de rochas metavulcano-sedimentares, denominada Grupo Pitangui nos relatórios internos consultados. Este Grupo foi bastante estudado pelos geólogos das empresas de mineração que o consideravam semelhante ao Grupo Nova Lima. Romano (2007) considerou a geologia desta região uma continuação da geologia do Quadrilátero Ferrífero, tendo sido abolido o nome Grupo Pitangui e adotada a nomenclatura de Grupo Nova Lima para toda esta sequência metavulcano-sedimentar.



**Figura 2.1:** Mapa geológico da área de estudo.

### 2.2.1 Embasamento Cratônico

O Complexo Divinópolis compreende uma série de gnaisses anfibolíticos e biotíticos, grosseiramente bandados, afetados por fusão parcial de diferentes intensidades, que resultaram em migmatitos de estruturas distintas. Localmente é possível observar restitos máficos a ultramáficos, bem como faixas espessas de ortognaisses protomiloníticos a miloníticos com grandes cristais de feldspato potássico róseos. Leucognaisses ortoderivados com bandamento fino a médio e fusão parcial incipiente, milonitizados, são observados ao longo das zonas de cisalhamento. Não há datações diretas para esta unidade, porém a idade entre 2800 Ma e 3200 Ma é estimada por relações de campo (Geobank, CPRM 2011). Toda a unidade é atravessada por inúmeras zonas de cisalhamento, onde se observa diversos corpos de anfibolitos e granitos de granulação fina a média, mas com dimensão restrita.



### **2.2.2 Grupo Nova Lima**

O Grupo Nova Lima foi dividido em diferentes unidades, agrupadas nas sequências Metaígneas e Metassedimentar; e Metassedimentar e Metavulcano-sedimentar, descritas abaixo segundo Romano (2007). A primeira sequência abriga os depósitos Faina, Satinoco e Turmalina, e a segunda os depósitos Pontal e Fazenda Experimental.

### **2.2.3 Sequência Metaígneas e Metassedimentar**

Esta sequência é subdividida de acordo com o índice de cor das rochas ígneas/vulcânicas em três unidades, de acordo com o critério proposto por Frizzo *et al.* (1991), para a divisão litoestratigráfica da região.

O termo metaígneas é utilizado em lugar de metavulcânico devido à dificuldade da caracterização da natureza vulcânica destas rochas. O alto grau de deformação e recristalização mineral dificulta esta identificação até mesmo em lâmina.

A sequência ocupa uma posição nitidamente basal no contexto do Supergrupo Rio das Velhas e se distribui ao longo de uma faixa alongada com direção preferencial noroeste – sudeste.

Unidade Metaultramáfica e Metamáfica: a disposição estrutural das camadas se dá em forma de faixas estreitas, alongadas e extremamente deformadas. Estas faixas se estendem desde a cidade de Conceição do Pará e se alongam com direção e sentido sudeste - noroeste até o limite da área.

As rochas características são serpentina-talco-carbonato-xisto, talco-xisto, talco-clorita-xisto, serpentinito, clorita-anfibólio xisto, clorita-biotita-xisto algumas vezes granatífero e raros níveis anfibolíticos. Sugere-se então um metamorfismo de baixo grau, apesar de todas apresentarem mineralogia secundária. O grau de alteração intempérico é brando e os melhores afloramentos estão no leito e margens do rio Pará.

Unidade Metassedimentar: dispõe-se como uma estreita faixa alongada de direção sudeste-noroeste. Esta faixa encontra-se dobrada e muito deformada, com indícios de milonitização e ultramilonitização. O posicionamento estratigráfico desta unidade não é muito bem definido, acreditando-se que ela ocorra entre a unidade metaultramáfica - metamáfica e a unidade metamáfica - meta-intermediária.

As rochas que caracterizam esta unidade são principalmente formação ferrífera bandada, filito carbonoso, clorita-anfibólio xistos, clorita xistos, granada-clorita-quartzo xistos, calcário e rocha silícica (*metacherts*), com porções sulfetadas e níveis portadores de cloritóide. A formação ferrífera apresenta-se em camadas com espessura menor que 10 m, compostas por quartzo, cummingtonita, magnetita, carbonato, granada e clorita. As principais ocorrências estão na estrada que vai da cidade de Conceição do Pará até a localidade de São João de Cima e na estrada que vai até o Pontal.

Unidade Metamáfica e Meta-intermediária: Esta unidade engloba uma grande quantidade de litotipos, tais como, anfíbolitos, clorita-anfibólio-xisto, sericita-quartzo-biotita xisto e metandesitos propilitizados. Os metandesitos apresentam proporções variáveis de biotita, epidoto, clorita, carbonato, plagioclásio e quartzo. A foliação é bastante variável, as atitudes predominantes são N20W/60NE – a noroeste e N65W/60NE – a sudeste, a atitude dos eixos das dobras sigmoidais presentes são preferencialmente N62E/ 54NE.

O grau de deformação destas rochas é muito forte, e por vezes se apresentam como milonitos e até mesmo ultramilonitos. Ladeira (1981) descreveu as primeiras estruturas primárias que revelam a natureza vulcânica destas rochas. Apesar de raras, na localidade de Velho da Taipa, embaixo da ponte sobre o rio Pará, é possível observar *pillow* lavas achatadas.

#### **2.2.4 Sequência Metavulcano-sedimentar e Metassedimentar**

Esta sequência foi dividida em duas unidades devido ao tipo de sedimento depositado. A unidade basal possui maior contribuição vulcano-sedimentar – re-sedimentação de níveis piroclásticos, enquanto na unidade de topo a contribuição principal é metassedimentar – filitos, quartzitos e *metacherts* ferruginosos. O alto grau de alteração intempérica, bem como a forte alteração hidrotermal e a intensa deformação dúctil, dificultam a identificação de estruturas primárias nestas rochas.

A sequência se distribui ao longo de uma faixa alongada com direção preferencial sudeste–noroeste e constitui a porção superior do Grupo Nova Lima

Unidade Metavulcano-sedimentar: as rochas que compõem esta unidade são metaconglomerados vulcânicos na base que gradam para metatufos e metalapilli tufos bem estratificados. Os metatufos possuem granulação fina e são compostos por biotita, sericita, clorita, quartzo por vezes azulado, plagioclásio, carbonato, rutilo e apatita. Os

metaconglomerados e matalapilli tufos contém também fragmentos líticos de clorita-actinolita xisto, *metachert* e dacito.

Estas rochas vulcanoclásticas apresentam foliações superpostas de direção variável entre N5W e N35E com mergulho de 55 para leste, porém são fracamente afetadas por dobramentos devido à sua alta competência.

Os termos da origem vulcanoclástica ou piroclástica são de difícil definição, contudo, as rochas no campo geralmente são reconhecidas pelo aspecto rítmico do bandamento, presença de manchas brancas (restos de feldspatos) e diferenças de granulometria. Geralmente os fragmentos mostram forma angulosa e muito baixo grau de arredondamento, o que supõe uma rocha verdadeiramente piroclástica.

Unidade Metassedimentar: esta unidade abrange diversos tipos de rochas metassedimentares, entre elas quartzitos, metacherts ferruginosos, formações ferríferas bandadas e filitos. Contudo apenas duas subunidades, denominadas **A4rnt** e **A4rns** por Romano (2007), foram mapeadas na área do Projeto Turmalina.

**A4rnt** – Esta subunidade corresponde a um pacote de rochas rítmicas, com muscovita, clorita e quartzo, além de camadas delgadas de quartzito micáceo muito fino e níveis ferruginosos e carbonosos. A maior resistência ao intemperismo destas rochas torna fácil sua diferenciação dos metatufos basais. No entanto, o grau mais de intemperismo e alteração hidrotermal transformam a rocha em um saprólito muito fino de cores variáveis entre o amarelo creme e o vermelho arroxeado.

**A4rns** – Esta subunidade é caracterizada por um conjunto de rochas metapelíticas, tais como filito muscovítico e filito clorítico, e em menor quantidade metavulcanoclásticas, como níveis finos de FFB (Formação Ferrífera Bandada), filito carbonoso e magnetitito não mapeáveis. O grau de intemperismo é muito acentuado e mascara as características das rochas tornando difícil sua identificação. Contudo, o aspecto metassedimentar rítmico, com bandas de granulometrias diferentes, apresentado em alguns afloramentos, sugere um ambiente, em parte, turbidítico para a litologia.

### **2.2.5 Rochas intrusivas**

A Suíte Intrusiva Mato Dentro é constituída por diversos corpos de granitóides biotíticos. Na região de estudo foram identificados dois destes corpos, que afloram próximos

à localidade de Casquilho. Em uma das ocorrências a rocha encontra-se muito bem exposta em uma pedreira em atividade.

Trata-se de dois corpos alongados sem continuidade física, sendo que a rocha não está deformada, mas intensamente fraturada e com juntas verticais preenchidas por clorita. A rocha na pedreira é leucocrática, cinza clara, com duas *fácies* petrográficas bem nítidas, uma mais clara e a outra mais escura. O granito é biotítico de grão médio a grosso e contém veios aplíticos ricos em sulfetos, principalmente pirita e molibdenita.

## **2.2.6 Coberturas Sedimentares**

Coberturas aluvionares terciárias e quaternárias encontram-se depositadas nas calhas dos rios São João, Pará e Ribeirão da Onça. Estes sedimentos são compostos por: cascalhos, areias e argilas inconsolidados; além de terraços aluvionares lateríticos e cascalhosos semiconsolidados. Geralmente os cascalhos foram lavrados para ouro na época dos bandeirantes.

## **2.3 Geologia Estrutural e Tectônica**

A principal feição tectônica da região é denominada Lineamento Pitangui (Romano & Noce, 1995; Romano & Paiva 1997), e representa a colisão entre dois núcleos crustais de idade arqueana: o Complexo Belo Horizonte ao norte e o Complexo Divinópolis ao sul. Este processo gerou uma zona colisional de direção noroeste-sudeste com largura máxima de 20 quilômetros, que apresenta pelo menos três faixas principais de cisalhamentos.

Na bacia oceânica desenvolvida nesta zona ocorreu a deposição da sequência *greenstone belt* Rio das Velhas. A colisão, segundo os indicadores cinemáticos mais antigos, é nitidamente oblíqua e sinistral. A idade mesoarqueana conferida a este processo é corroborada pela assinatura geoquímica de ambientes colisionais, apresentadas pelos granitos posicionados ao longo do lineamento.

A região é marcada por dois eventos deformacionais, D1 e D2. O primeiro evento, de idade arqueana, é constituído por duas fases de deformação principais, D<sub>n</sub> e D<sub>n+1</sub> (Romano 1993a; Heineck 1997).

A fase D<sub>n</sub> é marcada por um regime predominantemente dúctil, caracterizado por dobras apertadas, cujas direções axiais variam entre NW-SE e NE-SW, evidenciando uma disposição em leque do plano axial (Romano 1993a). Um plano de xistosidade S<sub>n</sub> se apresenta transposto ao acamamento S<sub>0</sub> e está associado às dobras. A fase D<sub>n+1</sub> é de regime

dúctil a dúctil-rúptil e exerceu influência sobre a região desde o Arqueano ao Transamazônico, produzindo dobras abertas com planos axiais variáveis entre NE-SW e NW-SE (Romano 2007; Secco 2009).

O segundo evento, D2, é caracterizado por um regime distensivo de idade brasileira, marcado pelo fraturamento e acomodação por gravidade de camadas calcárias e pelíticas do Grupo Bambuí com basculamento generalizado de blocos.. Não são visíveis marcas de deformação compressiva em tais rochas, sugerindo que o basculamento foi apenas um pulso de relaxamento provocado pelo sistema de cavalgamentos da Serra do Espinhaço (Secco 2009).

Eventos neotectônicos como reativação cenozóica são evidenciados a partir da existência de terraços aluvionares elevados, assim como falhas recentes que deslocam os depósitos sedimentares (Romano 1993a; Secco 2009).

#### **2.4 Mineralizações auríferas**

Os depósitos auríferos que compõem o Projeto Turmalina encontram-se associados às diferentes sequências que compõem o Grupo Nova Lima. Tratam-se de depósitos vulcanogênicos nos quais o ouro primário está disseminado em rochas ultrabásicas, básicas e piroclásticas. A concentração do metal se deu por processos de alteração hidrotermal, desenvolvidos ao longo de uma zona de cisalhamento dúctil-rúptil. Reconhece-se facilmente no terreno zonas de alteração segundo o modelo clássico, dos tipos sericítico e propilítico, com formação de níveis sulfetados, silicificados, carbonatados e cloritizados (Frizzo *et al* 1991; Campos *et al* 2008).

O ouro se concentra nos níveis sulfetados e cloritizados. Quando nos níveis sulfetados associa-se preferencialmente à arsenopirita, pirrotita, ou a pirita, sem preferência pelo sulfeto; o ouro livre é também comum na ganga. Em uma fase de deformação rúptil progressiva houve desestabilização dos sulfetos neoformados com liberação do ouro em estruturas do tipo *tension-gashes* geralmente formadas de quartzo hidrotermal. O ouro nestas condições forma grãos de tamanho submilimétrico liberados na matriz quartzo-clorítica (Frizzo *et al* 1991; Romano 2007).

A tipologia do minério varia segundo a ocorrência, sendo que em quatro locais (Figura 2.2) a mineralização foi melhor estudada. Estas ocorrências, algumas classificadas como jazidas, são descritas abaixo com base nos dados apresentados por Frizzo (1991), Romano

(2007), Takai *et al* (1990), Campos *et al* (2008), bem como relatórios internos das empresas de mineração que atuaram na região, já citadas anteriormente.

#### **2.4.1 Pontal**

O minério está associado às rochas piroclásticas (metaglomerados e metalapilli) da Sequência Metavulcano-sedimentar e Metassedimentar. As porções mineralizadas exibem alteração hidrotermal do tipo propilítica com formação de níveis silicatados, sulfetados e carbonatados. Estas rochas, que quando intemperizadas recebem o nome local de “hidrotermalito” por causa da cor resultante da oxidação, possuem geralmente de grãos fino, e sulfetos como arsenopirita pirrotita e pirita. A formação de quartzo hidrotermal está concentrada em fraturas e fendas distensionais, onde podem ocorrer pequenos nódulos de berthierita. Calcopirita, galena, esfarelita e antimônio nativo ocorrem em menor quantidade. O ouro ocorre incluso nos sulfetos ou em grãos livres com dimensões que variam entre 5 e 10 micra.

#### **2.4.2 Faina**

A unidade máfica-ultramáfica hospeda o minério que se trata de um biotita-anfibólio-clorita xisto com arsenopirita, pirrotita, pirita e rara berthierita. As porções mineralizadas têm espessura decimétrica a métrica e apresentam alteração hidrotermal do tipo propilítica evidenciada por níveis silicatados, sulfetados e carbonatados, além disso apresenta andamento composicional com maior abundância do sulfeto arsenopirita em detrimento dos outros.

A presença de arsenopirita em grãos muito finos (formando espécies de nuvens) e disseminados por toda a rocha apresenta teor significativo de Au, enquanto quando este mineral se apresenta em cristais bem formados comumente é estéril.

A transição entre os depósitos Faina e Turmalina se dá por uma zona intensamente brechada e estirada que indica o alto grau de deformação rúptil-dúctil naquela região. A razão rocha mineralizada/rocha hospedeira e o teor de ouro são similares aos do Pontal.

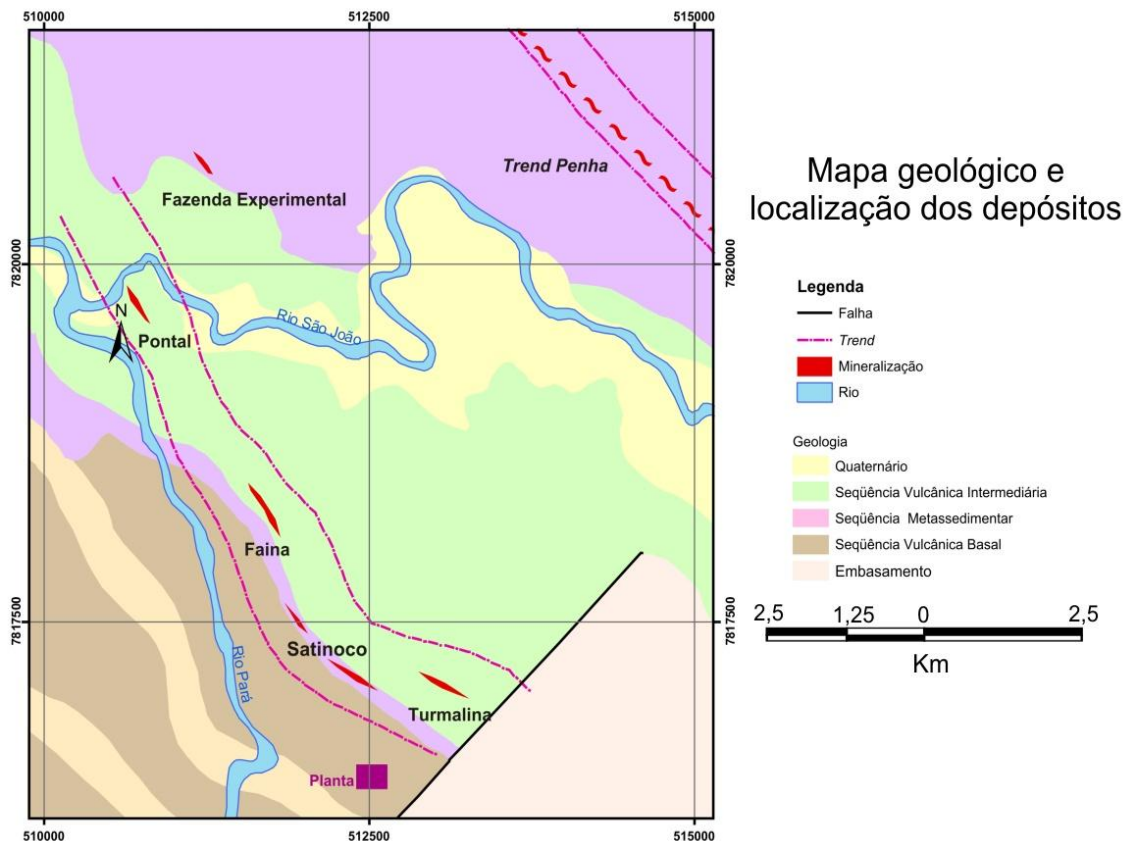


Figura 2.2: Depósitos auríferos do Projeto Turmalina (adaptado de Campos *et al* 2008).

### 2.4.3 Satinoco

A mineralização ocorre em um nível de anfibólio-quartzo xisto/BIF, encaixados em um horizonte de rochas metavulcânicas ultrabásicas na capa e de metatufos na lapa, correspondendo à unidade metassedimentar. O minério é identificado por faixa com forte silicificação, encaixada principalmente nos anfibólios-clorita-quartzo xistos, com presença de sulfetos disseminados e secundariamente no nível de BIF.

Três corpos principais foram identificados em Satinoco. O corpo principal (central) tem extensão de 220m, mergulho de 60° e espessura de 4 metros. Já os corpos NW e SE possuem 100m de extensão, mergulho de 60° e espessura de 3m. Estes corpos encontram-se alinhados segundo NW/SE e apresentam um plunge de controle N70E/60.

Este depósito não foi amostrado para as análises espectrais por localizar-se fora da região de estudo.

#### **2.4.4 Turmalina**

A mineralização ocorre em um nível de sericita-quartzo-biotita xisto encaixado em um horizonte de metapelito rítmico na capa e por nível de metatufos cloríticos na lapa. Acima do metapelito ocorrem novamente níveis de xisto tufáceo clorítico, correlacionáveis à parte superior da unidade metavulcano-sedimentar. O minério é identificado por uma forte silicificação do sericita-quartzo-biotita xisto com presença de sulfetos finíssimos de arsenopirita, pirrotita e pirita. Diferencia-se das outras jazidas da região pela quase ausência de carbonato e antimônio.

Há dois horizontes principais mineralizados, sendo o basal o mais potente com espessura real variando 2 a 17 metros e extensão segundo a direção (strike) de 221 m. Na capa ocorre um segundo horizonte, menos contínuo e com espessura real máxima de 5 m. A mineralização é estratiforme e à superfície sua atitude é N65W subvertical e à medida que se aprofunda o mergulho diminui para até 45° NE.

#### **2.4.5 Fazenda Experimental**

O minério está associado aos metafilitos e sericita xistos da Sequência Metavulcano-sedimentar e Metassedimentar. As porções mineralizadas exibem alteração hidrotermal do tipo propilítica com formação de níveis silicatados, sulfetados e carbonatados. Solos e metafilitos vermelhos muito alterados com pouca sílica caracterizam o minério, enquanto o minério, chamado localmente de “hidrotermalito” possui cor amarela devido aos processos intempéricos de transformação do carbonato, possuem geralmente de grãos fino, e sulfetos como arsenopirita, pirrotita e pirita. A formação de quartzo hidrotermal está concentrada em em charneiras de dobras e nas fraturas. O ouro ocorre inclusive nos sulfetos ou em grãos livres com dimensões que variam entre 5 e 10 micra.



### CAPITULO 3 – SENSORIAMENTO REMOTO MULTIESPECTRAL

A utilização de sensoriamento remoto na exploração mineral tem se tornado cada vez mais comum, devido ao sucesso apresentado pelos sensores da plataforma Landsat e, mais recentemente, pelo sensor ASTER (Sabins 1999; Crósta *et al.* 2003; Rowan *et al.* 2003; Souza Filho *et al.* 2003; Ducart 2007; Zachi *et al.* 2007, Cardoso 2009). Este tipo de ferramenta apresenta vantagens como: disponibilidade de dados em qualquer ponto do planeta; cobertura de grandes áreas; e baixo preço por quilômetro quadrado (Sabine 1999).

A capacidade do sensor ASTER em identificar a ocorrência e distribuição de minerais de alteração associados a depósitos minerais está diretamente ligada ao posicionamento de suas 9 bandas espectrais ao longo do espectro eletromagnético. A distribuição dessas bandas entre visível e infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) propicia a identificação de áreas ricas em óxidos/ hidróxidos de ferro e argilominerais/carbonatos, respectivamente (Crósta *et al.* 2003).

A ocorrência dos depósitos auríferos primário da região de Pitangui é conhecida há muitos anos, bem como sua associação a processos de alteração hidrotermal. Takai *et al.* (1990) descrevem as rochas hospedeiras destes depósitos como uma sequência do tipo greenstone belt e que apresentam alteração hidrotermal de diferentes intensidades.

A vegetação predominante na região de Pitangui é do tipo cerrado e floresta subcaducifólia que, aliada à cobertura de solos decorrentes do clima tropical de altitude, caracterizam as duas principais interferências na utilização do sensoriamento remoto para o mapeamento de minerais. Para minimizar a influência da vegetação na resposta espectral dos alvos de interesse foi utilizado um mascaramento ainda na etapa de pré-processamento. Contudo a interferência do clima se traduz nas espessas camadas de solo geradas por alteração supergênica, onde os minerais provenientes deste tipo de alteração podem se confundir aos minerais de alteração hidrotermal. Não há um método direto para evitar esta interferência e considerações sobre sua influência devem ser discutidas durante a interpretação dos dados processados.

O pré-requisito básico necessário para trabalhar com imagens de satélite é boa exposição do terreno, seja solo ou rocha. Esta ferramenta foi escolhida neste projeto pois as atividades empresa de mineração levaram à supressão da vegetação sobre as áreas contendo os corpos de minério. A cena ASTER escolhida no banco de dados, devido à época do ano mais favorável e com menor influência de nuvens, datava do ano de 2000, época na qual não

havia atividade minerária naquela região. Apesar da baixa densidade da vegetação presente, esta foi suficiente para mascarar a resposta espectral do substrato.

As empresas de mineração do Grupo Morro Velho iniciaram os trabalho de pesquisa e mineração na década de 80,mas em 1994 as atividades foram encerradas. Em 2004 a Jaguar Mining adquiriu o projeto da AngloGold Ashanti, que daquele intervalo incorporou o Grupo Morro Velho. Somente em 2006 reiniciaram-se as atividades de mineração a céu-aberto e subsolo que continuam em funcionamento até os dias atuais, conforme mostrado na figura 3.1.



**Figura 3.1:** Imagem obtida através do software Google Earth, correspondente a região da Mineração Turmalina em 20/05/2010.

### **3.1 Sensor Aster**

O sensor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) representa um empreendimento em conjunto entre Estados Unidos e Japão. A bordo do satélite Terra foi lançado pela NASA em dezembro de 1999, como parte do programa *Earth Observation System* (EOS). Cada cena obtida pelo sensor recobre uma área de 60 x 60 km.

Abrams (2000) descreve a órbita do satélite Terra como solar síncrona a uma altitude de 705 km. Este satélite cruza o paralelo do Equador em trajetória descendente às 10:30, horário local, e retorna ao mesmo ponto a cada 16 dias.

Três subsistemas de imageamento independentes, que coletam dados em distintas porções do espectro eletromagnético compõem o sensor ASTER, como mostrado na Tabela 3.1. Na região do VNIR existem 3 bandas com resolução espacial de 15 metros; na região do SWIR há 6 bandas com resolução espacial de 30; e na região do infravermelho termal (TIR) são 5 bandas com resolução de 90 metros. Este sensor possui adicionalmente um telescópio de retrovisada que gera uma banda adicional, com as mesmas características da terceira banda do VNIR, formando assim um par estereoscópico que possibilita a geração de modelos digitais de elevação – DEM (Abrams 2000).

**Tabela 3. 1: Principais características do sensor ASTER.**

Subsistema	Resolução espacial (m)	Banda nº	Intervalo espectral (nm)
VNIR	15	1	0,520 - 0,600
		2	0,630 - 0,690
		3B e 3N estereopar	0,760 - 0,860
SWIR	30	4	1,600 - 1,700
		5	2,145 - 2,185
		6	2,185 - 2,225
		7	2,235 - 2,285
		8	2,295 - 2,365
		9	2,360 - 2,430
TIR	90	10	8,125 - 8,475
		11	8,475 - 8,825
		12	8,925 - 9,275
		13	10,250 - 10,950
		14	10,950 - 11,650

O ASTER é caracterizado como um sensor de média resolução espectral, entretanto suas bandas espectrais são posicionadas em comprimentos de onda importantes para a identificação de minerais de alteração (Abrams 2000). Por esse motivo este sensor orbital tem sido amplamente utilizado em atividades exploratórias para metais base e preciosos, como é o caso da Cordilheira Andina (Crósta *et al.* 2003; Ducart *et al.* 2004). Uma vez estabelecidas as assembleias minerais de interesse para uma determinada atividade de exploração, pode-se buscar suas características espectrais em imagens de sensoriamento remoto. Desta forma pode-se cobrir regiões ainda desconhecidas além de reduzir consideravelmente os custos exploratórios. Diversos trabalhos utilizaram imagens ASTER para o mapeamento de minerais de alteração hidrotermal, supergênica e unidades geológicas.

### 3.2 Pré-processamento

A cena ASTER da área de estudo foi selecionada do catálogo de imagens disponíveis no repositório do *Earth Resources Observation and Science Center* (EROS), do *United*

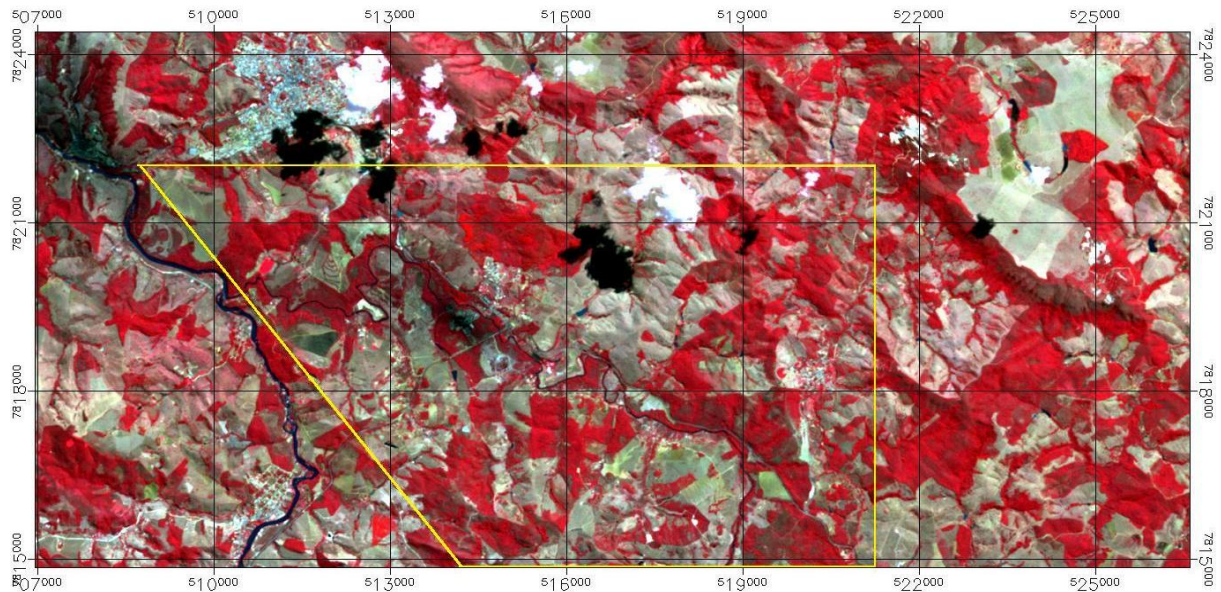
*States Geological Survey (USGS)*, por meio do aplicativo “*Global Visualization Viewer – Glovis*” (<http://glovis.usgs.gov/>). Buscou-se uma cena com o mínimo possível de cobertura de nuvens e com boas condições de exposição do terreno. A cena utilizada foi imageada pelo sensor ASTER a bordo do satélite Terra da NASA na data de 20/08/2000 e continha 10% de cobertura de nuvens.

O próximo passo foi a ortorretificação da cena ASTER, utilizando o aplicativo ASTERDTM, desenvolvido pela empresa Sulsoft (<http://www.envi.com.br/ASTERdtm/>) e que funciona como um *plug-in* do Envi. O ASTERDTM utiliza a capacidade de gerar pares estereoscópicos por diferença de paralaxe do ASTER, por meio das banda 3N e 3B. O ASTERDTM converte essas duas bandas num par de imagens "quasi-epipolar" (o centro da imagem orientado exatamente par o norte), com um deslocamento de pixel na direção do voo do satélite proporcional à sua elevação topográfica. O método de "correlação cruzada" é usado para determinar esse deslocamento, o qual é transformado em valores de elevação topográfica. Após gerar o modelo digital de terreno, o módulo o aplica na ortorretificação dos conjuntos de bandas espectrais da cena.

Em seguida, foi feito o recorte da cena completa, produzindo um conjunto de bandas espectrais do VNIR, SWIR e TIR para a área de estudo e região do entorno.

Antes do processamento principal para mapeamento de minerais, utilizando a técnica de análise por principais componentes, foi necessário ainda gerar dois tipos de máscaras e aplicá-las à cena recortada da área de estudo. O objetivo dessas máscaras é maximizar a resposta espectral dos alvos de interesse (neste caso, minerais) e minimizar a contribuição espectral dos alvos que não possuem interesse, e que podem dificultar a identificação dos minerais. Neste caso, esses alvos incluíram a presença de algumas nuvens, assim como suas respectivas sombras projetadas no terreno, e de vegetação. Esta última, apesar de ter sido selecionada uma imagem da época seca (mês de agosto), está presente na cena em proporções consideráveis, como pode ser visto pela cor vermelha da composição colorida falsa-cor das bandas 321 (em RGB) do ASTER, mostrada na Figura 3.2.

A máscara para nuvens e respectivas sombras foram geradas desenhando-se polígonos sobre as áreas da imagem e, em seguida, transformando os vetores desses polígonos em imagem do tipo binária (branco e preto). Nesta imagem, as áreas das nuvens e sombras são representadas por pixels com valor zero (preto) os quais, ao ser aplicada a máscara sobre a imagem, tornam os valores dos pixels dessas áreas iguais à zero, removendo-os assim dos cálculos estatísticos nos quais se baseia a transformação por principais componentes.



**Figura 3.2:** Composição colorida falsa-cor das bandas 321 (em RGB) do ASTER, evidenciando a vegetação em vermelho, o polígono amarelo corresponde à área de estudo.

A máscara para vegetação foi gerada a partir do cálculo do NDVI (índice normalizado de diferença da vegetação) (Jensen, 1996). Esse índice mapeia os pixels com vegetação fotossinteticamente ativa (vegetação verde) a partir de um índice calculado utilizando as bandas B2 e B3 do ASTER (correspondentes aos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo, respectivamente). A fórmula para esse cálculo é dada pela equação 3.1.

$$\frac{B3 - B2}{B3 + B2} \quad (\text{equação 3.1})$$

Uma vez calculada a imagem do NDVI, segundo os critérios acima descritos, estabeleceu-se um valor de limiar para separar os pixels com vegetação fotossinteticamente ativa dos pixels sem vegetação (ou com pouca vegetação). Estabelecido o limiar, foi gerada uma imagem binária (pixels com valor zero representando os que continham vegetação e pixels com valor 1 os sem vegetação). Essa imagem binária foi transformada em máscara e aplicada sobre a cena contendo a área de estudo, após a aplicação da máscara de nuvens. A cena resultante da aplicação sucessiva dessas duas máscaras foi então utilizada para gerar os parâmetros estatísticos da cena para a posterior aplicação da análise por principais componentes.

### 3.3 *Processamento Digital de Imagens*

Entre as várias técnicas de mapeamento mineral existentes, foi utilizada no presente estudo uma técnica baseada em análise de principais componentes (APC). Desenvolvida por Crósta & Moore (1989) a PC Orientada por Feições (Feature-Oriented Principal Component Selection - FPCS) foi proposta para o realce espectral de óxidos/hidróxidos de ferro, a partir de dados Landsat TM.

A técnica FPCS visa estabelecer a relação entre as respostas espectrais dos materiais de interesse (solos ricos óxido de ferro) e os valores numéricos extraído da matriz de autovetores (*eigenvector*), utilizados para calcular as principais componentes (PC) das imagens. Utilizando esta informação é possível identificar a PC que possui as informações espectrais dos materiais de interesse, bem como, se esta informação será apresentada como valores altos ou baixos, de acordo com o nível de cinza (DN) de cada pixel (Crosta e Moore 1989; Campello *et al* 2005).

A técnica Crósta, proposta por Loughlin (1991), representa uma modificação da técnica FPCS, em que conjuntos específicos de bandas são submetidos à APC. Desta forma evita-se que alguns materiais não sejam mapeados. A APC dos diferentes conjuntos de 4 bandas nas regiões do VNIR e SWIR propiciam o mapeamento de argilominerais de alteração hidrotermal e óxidos/hidróxidos de ferro derivados do intemperismo de sulfetos.

A ideia de aplicar APC para gerar mapas de abundância mineral, utilizando dados espectrais de alta dados de resolução foi proposta por Crósta *et al.* (1996) e Prado e Crósta (1997). Nesta ocasião foram utilizadas as 24 bandas do sensor aerotransportado Geoscan, cobrindo o espectro eletromagnético nas porções VNIR, SWIR e TIR (cobertura espectral similar às fornecidas pelo sensor orbital ASTER), para produzir mapas de abundância de hematita, goethita, calcita-clorita, muscovita-sericita-caulinita e concentrações de sílica, relacionadas com a mineralização de ouro em rochas hidrotermalmente alteradas de um *greenstone belt*.

A semelhança entre a cobertura espectral fornecida pelos sensores Geoscan e ASTER é possibilita a utilização da técnica Crósta para identificação de minerais de alteração e sua distribuição espacial (Crósta *et al* 2003; Zacchi *et al* 2007).

O processamento dos dados foi realizado no programa de processamento de imagens ENVI® (RSI), e iniciou-se pela aplicação da APC ao conjunto de bandas propostos para cada mineral, Tabela 3.2.

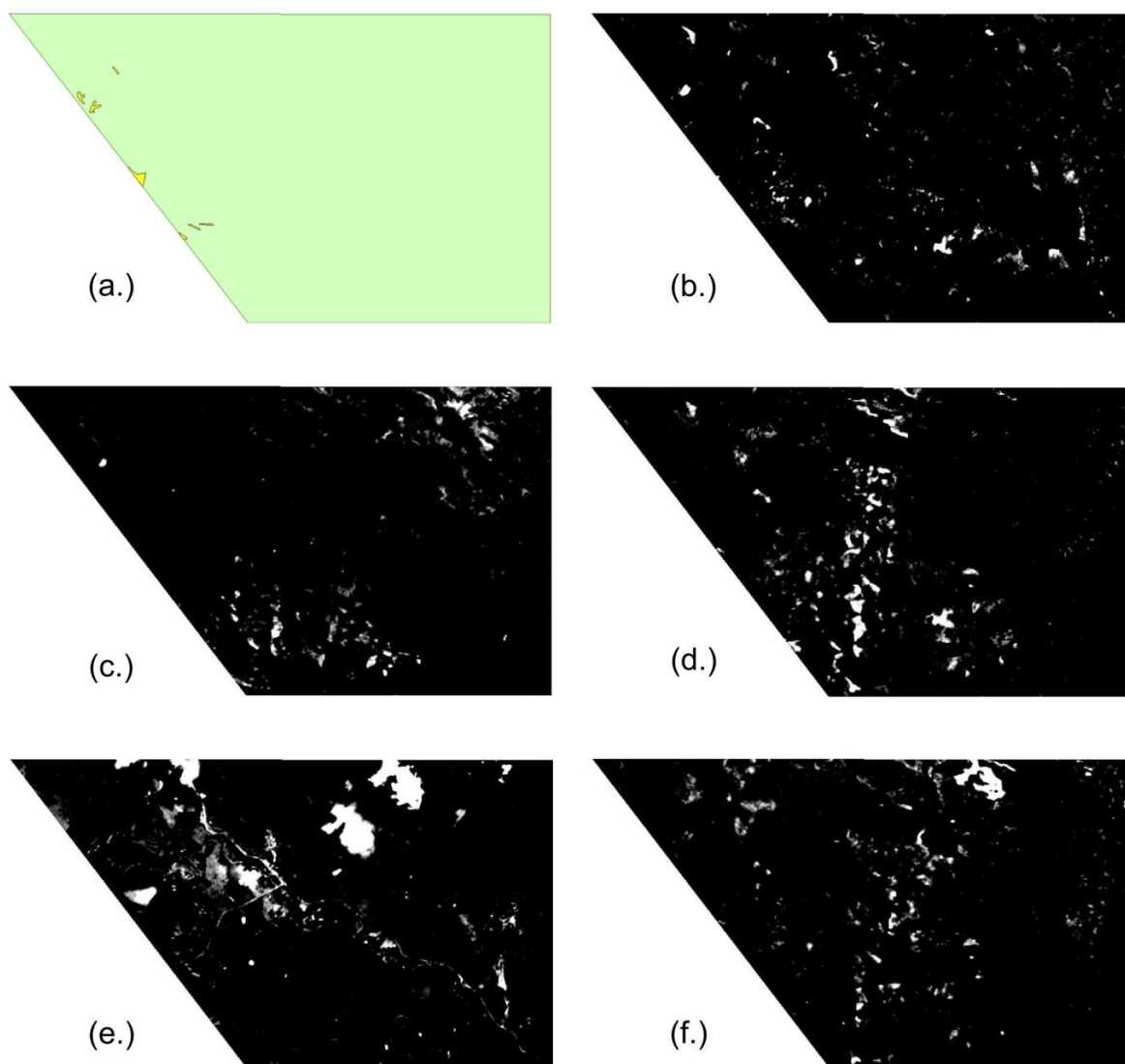
**Tabela 3.2: Bandas ASTER (VNIR e SWIR) utilizadas para gerar os mapas de abundância de mineral, pela utilização do método Crósta, na região de Pitangui-MG.**

Minerais de Alteração	Alunita	Calcita	Caulinita	Caulinita + Esmectita	Dolomita	Ilita	Óxido de ferro	Pirofilita	Quartzo
	1	1	1	1	1	1	1	1	10
<b>Bandas ASTER</b>	3	6	4	4	5	3	2	3	12
	5	8	6	6	7	5	3	4	13
	7	9	7	9	9	6	4	5	14

A partir das estatísticas calculadas a matriz de autovetores (eigenvector) é analisada para identificar qual PC contém as informações espectrais do alvo. O critério de identificação utilizado é o mesmo proposto por Loughlin (1991) e Crósta *et al* (2003): a PC que contém as informações espectrais mais significativas sobre o alvo é aquela que apresenta o par de autovetores com maior valor. Este par representa as bandas que registram os picos de absorção (negativo) e reflexão (positivo). Em geral as PC's 3 e 4 são as portadoras das informações de interesse.

Após a identificação da PC representativa para cada mineral, foram gerados mapas de abundância em níveis de cinza, onde os *pixels* de valores mais altos (branco) indicam as maiores concentrações minerais. A partir destes mapas foram selecionados os minerais mais adequados para a caracterização da alteração hidrotermal dos depósitos do Projeto Turmalina e região de entorno, Figura 3.3.

Foram selecionados como minerais de referência alunita, caulinita, caulinita/esmectita, óxidos de ferro e a pirofilita. Em seguida foram determinados dois grupos, cada um abrangendo 3 minerais, para a combinação em composições coloridas RGB onde cada uma destas cores representa um mineral de referência. Estas composições estão representadas nas figuras 3.4 e 3.5. Para realçar a concentração mineral foram utilizadas as ferramentas Interactive Stretching, seguido por um filtro de mediana 3x3. Como resultado tem-se uma imagem em que as cores são bastante realçadas em relação à imagem original. Para apresentação e localização dos resultados foi utilizada a Banda 3 do sensor ASTER em tons de cinza como background.

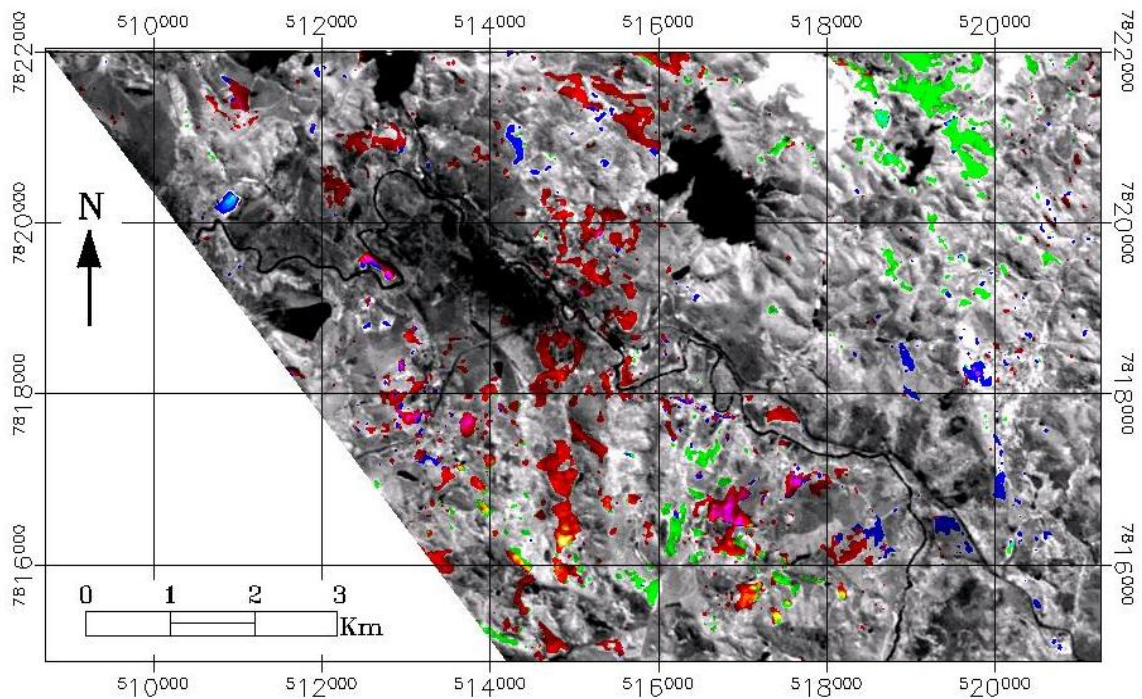


**Figura 3.3:** Mapa da localização dos depósitos do Projeto Turmalina em (a.). Mapas de abundância mineral na região de Pitangui para: (b.) óxido de ferro (c.) caulinite/esmectita (d.) caulinite (e.) pirofilita (f.) alunite.

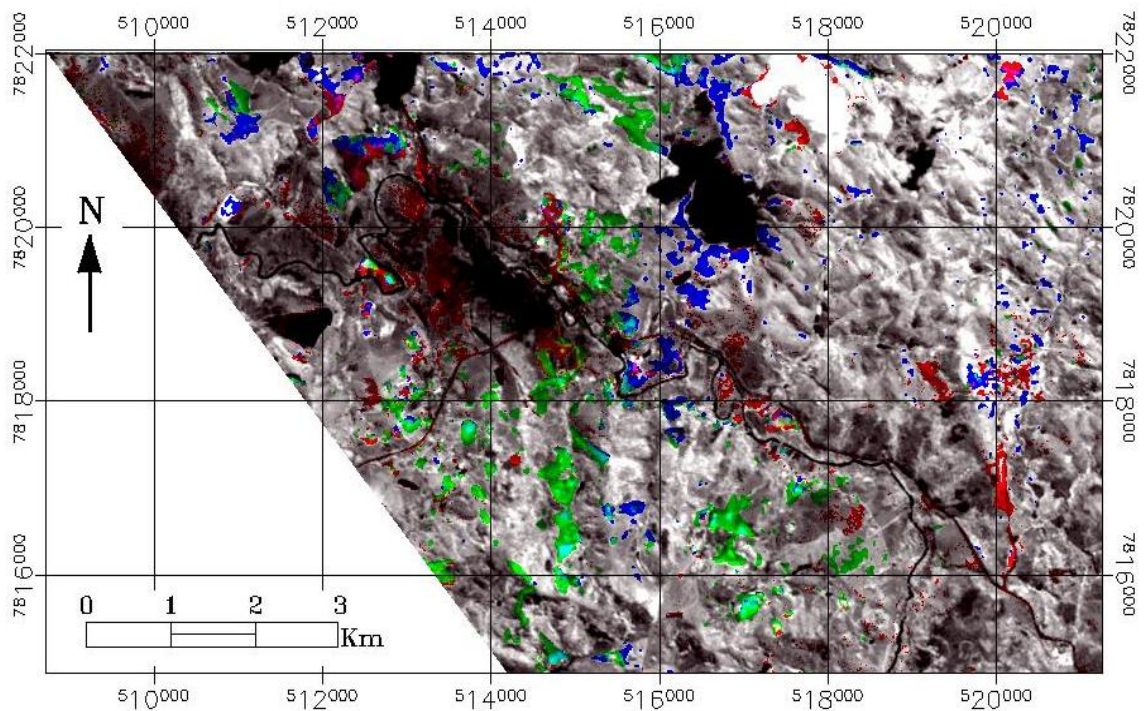
Durante a aplicação da APC e avaliação dos resultados verificou-se a presença de uma faixa vertical (linhas amarelas), que apresentam altos valores de reflexão para a maior parte dos minerais analisados, linh. Contudo os altos valores não estão associados à abundância mineral de boa exposição de minerais de alteração, sendo na verdade ruídos de interferência.

Os minerais escolhidos mostraram rara exposição na área de estudo e não apresentaram grandes concentrações nas regiões dos depósitos do Projeto Turmalina. Desta forma este método de investigação mostrou-se pouco eficaz para a melhor definição da distribuição e composição da zona de alteração hidrotermal daquela região.





**Figura 3.4:** Composição colorida RGB dos minerais: caulinita, caulinita/esmectita e óxidos de ferro.



**Figura 3.5:** Composição colorida RGB dos minerais: pirofilita, kaolinita e alunita.

As outras possibilidades que justificariam o baixo grau de resposta espectral nesta região seria a ausência dos minerais analisados no minério, ou a ausência destes minerais em superfície devido à alteração intempérica. A mineralogia do minério descrita no capítulo 2

inclui minerais como sericita, muscovita e carbonato que poderiam ser identificados caso estivessem expostos em superfície.

Apesar do enriquecimento efetivo em quartzo nas porções mineralizadas da rocha, não foi possível utilizar o mapa de abundância deste mineral. As bandas 10, 12, 13 e 14 do sensor ASTER situadas na região do infravermelho termal, apresentam baixa resolução espacial (90 metros). Devido à forma delgada dos corpos individuais que formam o depósito Turmalina, acredita-se que esta resolução não tenha sido suficiente para fornecer as respostas espectrais consistentes.

### 3.4 Fotointerpretação

A partir da cena ASTER foi realizada adicionalmente a fotointerpretação, com o objetivo de identificar as principais feições geológicas do terreno. A Figura 3.6 mostra os lineamentos extraídos da extraídos do mapa geológico e os lineamentos extraídos da imagem de satélite combinada ao modelo digital de elevação (MDE).

O DEM trata-se da representação matemática da distribuição espacial de uma superfície real, e é obtido a partir da própria imagem ASTER, devido a estereoscopia proporcionada pelo telescópio de retrovisada adicional da banda 3 (par estereoscópico 3B e 3N).

No mapa geológico estão representados os principais lineamentos da zona de cisalhamento Pará de Minas, bem como uma falha transcorrente.

Na imagem ASTER foram identificados 73 lineamentos, com orientação preferencial noroeste-sudeste, concordantes com as principais estruturas do Lineamento Pitangui. Contudo, apesar da identificação de um lineamento semelhante à falha mostrada no mapa geológico,

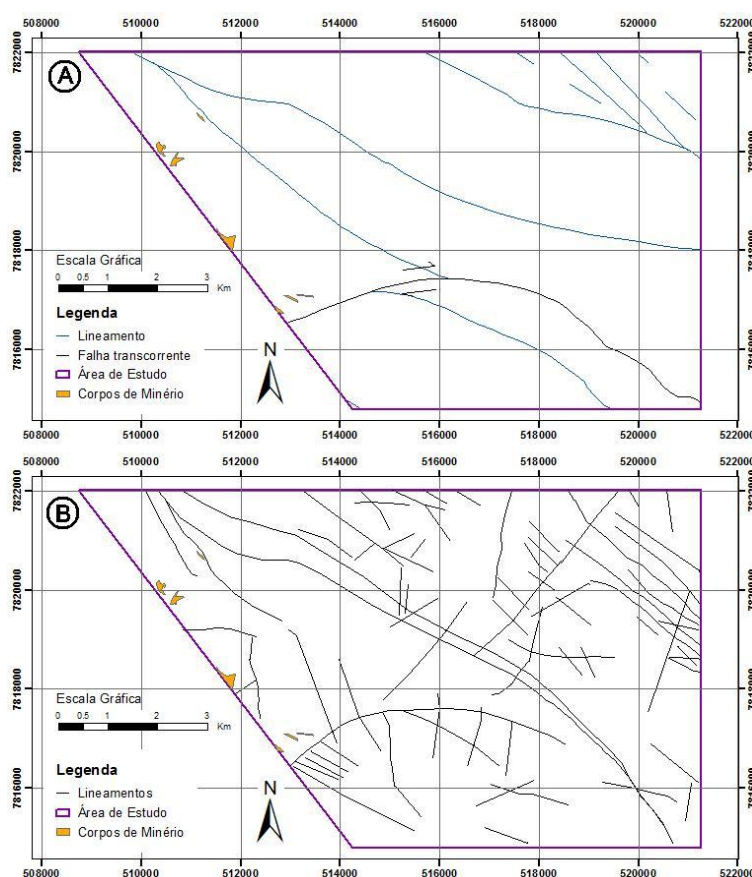


Figura 3.6: (A) Lineamentos extraídos sa imagem ASTER; (B) Lineamentos apresentados pelo mapa geológico por Romano (2007)

não foi possível definir a direção de movimentação.

## **CAPÍTULO 4 – AEROGEOFÍSICA**

Métodos geofísicos como gamaespectroscopia e magnetometria são tradicionalmente utilizados nas atividades de prospecção mineral, como apoio ao mapeamento geológico. Com a evolução das técnicas de aquisição e processamento de dados, esta ferramenta tem se tornado mais eficiente, possibilitando também a identificação de zonas de alteração hidrotermal que podem indicar a presença de mineralizações em diversos ambientes geológicos (Fornazzari *et al.* 2001).

O método gamaespectrométrico tem como fundamento básico a desintegração de elementos radioativos que libera energia através da emissão de partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e radiação gama ( $\gamma$ ). Essa desintegração ocorre devido à instabilidade dos núcleos dos átomos desses elementos sob as condições ambientais naturais. Contudo, o alcance das partículas  $\alpha$  e  $\beta$  é extremamente limitado, sendo apenas a radiação  $\gamma$  detectável de forma significativa por sensores aerotransportados (Telford 1990; Zagatto 2011).

A radiação gama detectada na superfície terrestre provém, principalmente, da desintegração natural do potássio ( $^{40}\text{K}$ ) bem como dos elementos da série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ). (Faure 1997). Contudo, esta emissão é detectada somente para profundidades da ordem de alguns centímetros, devido à perda de energia do raio gama ao atravessar a superfície e a densidade da rocha/solo (Zagatto 2011).

O método magnetométrico consiste na medida campo magnético resultante na superfície da Terra. Esse campo corresponde à sobreposição de três componentes distintos: (1) campo magnético principal originado no núcleo externo do planeta; (2) campo magnético externo associado aos fenômenos físicos que ocorrem na Ionosfera; (3) campo magnético crustal que tem como fonte formações geológicas na litosfera (Miranda 2005).

Diques básicos, formações ferríferas bandadas, assim como as falhas e fraturas são as mais importantes feições identificadas pelo método magnetométrico, pois geralmente apresentam magnetização superior a das rochas encaixantes. O estudo da magnetização remanente nas rochas é mais utilizado na reconstrução da variação temporal da orientação do campo magnético terrestre (Ussami *et al.* 1991).

#### 4.1 Dados gamaespectrométricos e magnetométricos

O município de Pitangui figura como um dos cento e dois municípios recobertos pela Área 2 do Programa de Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais. O contrato de execução dos serviços firmado em 25 de julho de 2000 entre Secretaria de Estado de Minas e Energia (SEME) e a Lasa Engenharia e Prospecções S.A. previa serviços de aquisição e processamento de dados aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos, sendo a Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig) responsável pelo projeto.

A execução do levantamento aerogeofísico se deu entre os meses de agosto de 2000 e março de 2001, utilizando-se de magnetômetro, gamaespectrômetro, e sistema de navegação GPS Sercel NR-103 de 10 canais, em cada uma das duas aeronaves Cessna modelo 404 – Titan utilizadas.

A Área 2 foi dividida em dois blocos: Oeste e Leste, sendo o município de Pitangui incluído no Bloco Oeste (Figura 4.1). Este bloco compreendeu uma superfície de 21.564 km<sup>2</sup> com direção de linhas de produção N30E e linhas de controle N60W. Os espaçamentos entre as linhas de voos utilizados foram 250 m para as de produção e 2.500 m para as de controle. A altura média de voo foi 100 m a uma velocidade aproximada de 200 km/h.

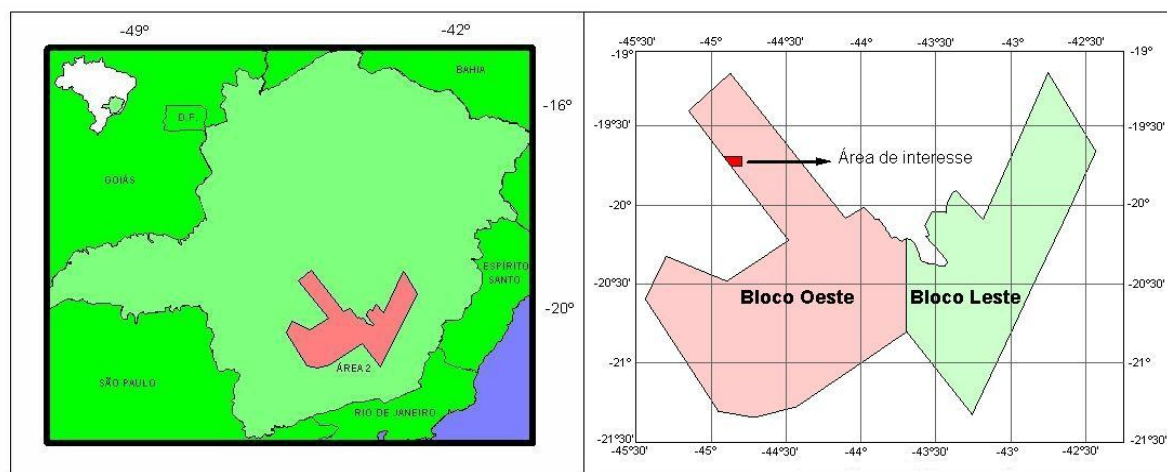


Figura 4.1: Levantamento aerogeofísico Codemig/Lasa - ÁREA 2: PITANGUI, SÃO JOÃO DEL REI, IPATINGA

Os dados foram registrados a bordo das aeronaves, em formato digital e analógico, pelo sistema de aquisição GEODAS. Duas estações fixas foram instaladas para monitoração da órbita dos satélites e controle da variação diurna do campo magnético terrestre, sendo uma para cada bloco.

O produto final disponibilizado pela Lasa/Codemig, contém os arquivos de dados brutos com correção de erros grosseiros, os arquivos de dados corrigidos finais, bem como algumas combinações destes dados.

## **4.2 Magnetometria**

O sensor do magnetômetro utilizado é do tipo vapor de césio, GEOMETRICS G-822A, com resolução de 0,001 nT, montado no prolongamento da cauda da aeronave. O sinal é recebido através de um pré-amplificador, localizado na base do cone de cauda e enviado aos sistemas de aquisição de dados GEODAS e de compensação aeromagnética, modelo RMS AADC-II.

Para controlar as variações diurnas do campo magnético foi utilizado um magnetômetro SCINTREX modelo CS-2, de resolução de 0,001 nT, instalado na base aérea do Bloco Oeste no município de Santo Antônio do Amparo.

Os dados brutos obtidos no levantamento aéreo necessitam de algumas etapas de pré-processamento, com o objetivo de normalizar os dados e gerar padrões de magnetismo que reflitam feições geológicas da área investigada. O conjunto de dados magnetométricos utilizados no presente projeto são os dados corrigidos finais, pois já possuem as correções de variação diurna, erro de paralaxe, nivelamento dos perfis, bem como a remoção do (IGRF).

- Correção da Variação diurna: corrige a variação do campo magnético causada pelos ventos solares que perturbam a Ionosfera. Estes ventos produzem um campo magnético interplanetário que interagem com o campo geomagnético, ocasionando principalmente variações diurnas no campo geomagnético. Esta correção foi efetuada com base nas medidas do magnetômetro de monitoramento constante, instalado na base de Santo Antônio do Amparo;
- Correção do erro de paralaxe: corrige a defasagem nos tempos de medição do magnetômetro e altímetros em relação ao sistema de posicionamento. Este erro é determinado a partir de duas linhas voadas em sentidos opostos sobre uma mesma feição magnética reconhecida no terreno. A correção é aplicada somando-se o tempo de defasagem ao tempo de amostragem, assim as feições se tornam coincidentes;
- Nivelamento dos perfis: consiste no nivelamento das linhas controle às linhas de voo por aplicação de valores, para que a diferença de nível entre elas seja mínima. Na segunda etapa todas as linhas de voo são ajustadas às linhas de controle, de forma que os valores dos campos magnéticos dos cruzamentos sejam equivalentes;

- Correção do campo principal: corrige a variação do campo magnético terrestre em função da latitude e longitude pela redução sobre o modelo, neste caso foi utilizado o Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF).

### 4.3 Processamento de dados e Discussões

O mapa da amplitude do sinal analítico está apresentado na Figura 4.2, sendo comumente utilizado para identificação da distribuição dos corpos magnéticos em subsuperfície. Como as rochas mineralizadas do Grupo Nova Lima incluem também lentes de formação ferrífera bandada, esperava-se conseguir com esses dados determinar a distribuição deste litotipo. Contudo as principais anomalias magnéticas não correspondem à distribuição espacial destas rochas, unidade metassedimentar, mostradas pelo mapa geológico da área.

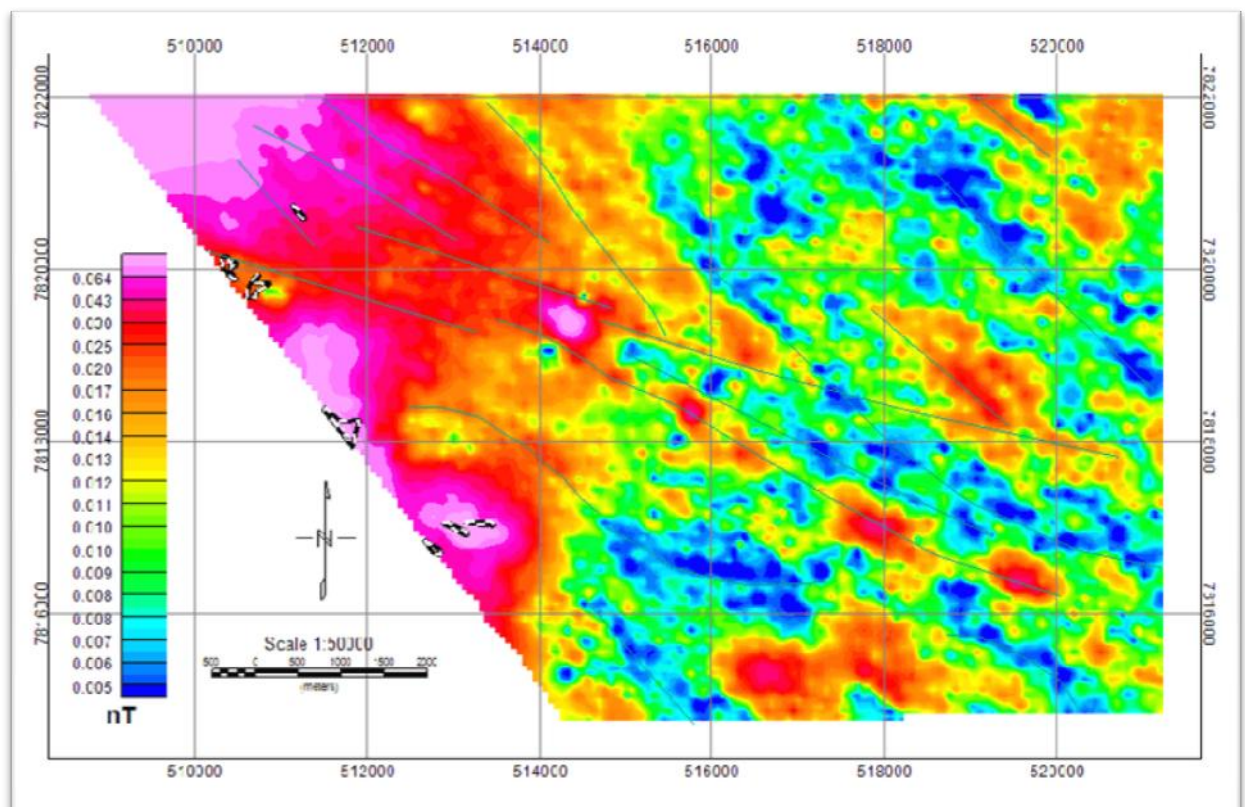


Figura 4.2: Mapa de amplitude do sinal analítico, os polígonos delimitados em preto e branco correspondem aos corpos de minério.

A anomalia magnética apresentada pelas rochas da região confirma a existência de alguns lineamentos, já identificados pela fotointerpretação. No entanto a identificação destes através do método magnético pode indicar que estes lineamentos são profundos, Figura 4.3.

Assim como o mapa da Figura 4.2, evidencia um padrão de distribuição da anomalia noroeste-sudeste, semelhante ao padrão regional de deformação.

Os corpos A e B do depósito Morro da Turmalina possuem características diferentes dos demais, pois não apresentam alteração carbonática. No mapa de sinal analítico do campo magnético este depósito ocorre no centro de uma anomalia magnética. Os outros depósitos não apresentam posicionamento significativo em respeito das anomalias magnéticas.

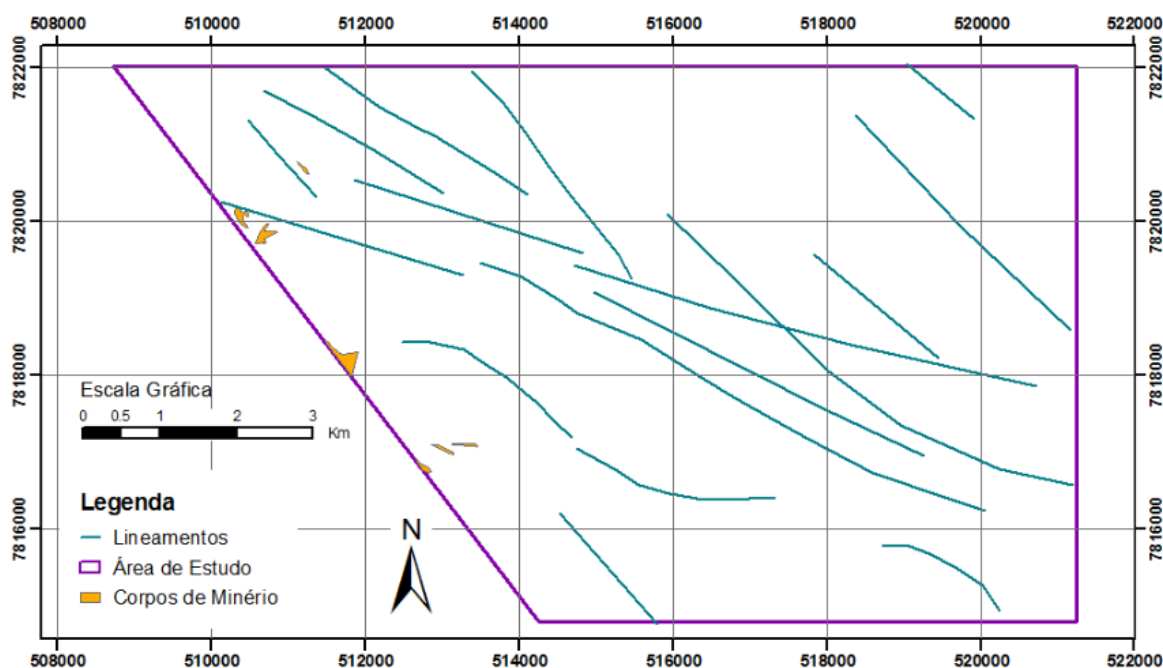


Figura 4.3: Lineamentos extraídos dos dados magnetométricos.

#### 4.4 Gamaespectrometria

O gamaespectrômetro utilizado foi o EXPLORANIUM, modelo GR-820, de 256 canais espectrais. Neste sensor, o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação precisa dos fotopicos de cada elemento (Tab. 4.1). O sistema detector é constituído por quatro cristais de NaI, voltados para baixo (*downward*) e para cima (*upward*), para detectar as emissões do terreno e monitorar as radiações decorrentes da influência do radônio na faixa energética do canal do urânio (1,66 a 1,86 MeV), respectivamente.

Tabela 4.1: Correspondência entre as janelas do gamaespectrômetro e seus respectivos picos de energia.

Canal Radiométrico	Faixa de Energia (MeV)	Canais Correspondentes
--------------------	------------------------	------------------------

Contagem Total	0,41	2,81	34	233
Potássio	1,37	1,57	115	131
Urânio	1,66	1,86	139	155
Tório	2,41	2,81	202	233
Cósmico	3,00	∞	256	-

Os dados brutos de gamaespectromeria necessitam algumas correções para normalização dos dados e eliminação de ruídos de interferência. Assim como os dados de magnetometria, as principais correções foram efetuadas pela CODEMIG/Lasa, através de rotinas do software Oasis-RPS da Geosoft. Esta etapa de pré-processamento envolveu as correções de tempo morto, efeito Compton e altimétrica além da padronização da altura de voo, remoção das interferências da aeronave, cósmica, e do radônio. Finalmente é feita a conversão do sinal registrado para concentração de elementos, como os dados não apresentam erro de paralaxe esta correção não foi necessária.

Desta forma o conjunto de dados gamaespectrométricos utilizados no presente projeto são os dados corrigidos finais. Todas as etapas de pré-processamento seguiram as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, com as seguintes correções:

- Correção do Tempo Morto: normaliza os valores brutos dos canais da contagem total, potássio, urânio, tório e urânio *upward* para contagens por segundo, a partir da divisão das contagens dos canais radiométricos pelo valor do *live time* registrado pelo aparelho;
- Remoção das interferências da Aeronave e Cósmica: a remoção destes dois tipos de interferências é realizada conjuntamente. O cálculo das contribuições da aeronave e da radiação cósmica é obtido através do somatório das contribuições do *background* da aeronave e da radiação cósmica em cada uma das janelas do gamaespectrômetro, pela fórmula  $N = a + bC$ , onde N representa o somatório das duas contribuições (em cps), a o *background* da aeronave em cada janela do gamaespectrômetro, C o canal de radiação cósmica e b a razão entre a contagem em determinada janela e a contagem no canal cósmico.

Os coeficientes aplicados aos dados (**a** e **b**) foram definidos pela CODEMIG a partir de vôos cósmicos sobre o mar, em diferentes alturas sobre uma área distante da costa;



- Remoção da interferência do Radônio: o efeito do background do radônio é determinado a partir das contagens feitas na janela do urânio pelo detector *upward*, contudo a correção deve ser aplicada aos dados previamente corrigidos do *background* cósmico e da aeronave. A parcela de radônio que influi no canal do urânio é definida pela seguinte expressão:

$$U_r = (u - a_1U - a_2Th) + (a_2bt - bu) / (au - a_1 - a_2at)$$

Onde  $U_r$  representa o *background* do radônio medido no canal *downward* do urânio,  $au$  contagem medida no canal *upward* do urânio,  $U$  a contagem medida no canal *downward* do urânio e  $Th$  a contagem medida no canal *downward* do tório.

Caso a interferência da aeronave e da radiação cósmica tenha sido completamente removidas os coeficientes de proporcionalidade  $bu$  e  $bt$  serão considerados iguais à zero, como neste caso. Os coeficientes de proporcionalidade  $a_1$  e  $a_2$  correspondem aos coeficientes *skyshine* e foram calculados pela CODEMIG/Lasa.

- Correção do Efeito Compton: elimina a influência das radiações atribuídas aos canais de mais alta energia que penetram nos canais de baixa energia, bem como as influências de radiações de baixa energia nas janelas de energia mais alta. Desta forma são utilizados seis coeficientes para correção do efeito Compton, calculados para cada aeronave utilizada no levantamento aerogeofísico:  $\alpha$  - radiações de tório no urânio;  $\beta$  - radiações de tório no potássio;  $\gamma$  - radiações de urânio no potássio;  $a$  - radiações de urânio no tório;  $b$  - radiações de potássio no tório;  $g$  - radiações de potássio no urânio.
- Cálculo da Altura Padrão de Voo: ajusta a altura de voo com base na temperatura e pressão ambientais utilizando-se da fórmula  $hc = h (273.15/T+273.15) \times (P/1.013.25)$ , onde  $h$  - altura de voo medida pelo radar altímetro,  $T$  - temperatura do ar medida em °C e  $P$  - pressão atmosférica em milibar (obtida a partir da altitude medida pelo altímetro barométrico).
- Correção Altimétrica: referencia os valores radiométricos à altura nominal das linhas de voo do aerolevante (100m), com o objetivo de eliminando falsas anomalias ocasionadas por elevações no terreno. A atenuação das radiações gama em relação ao afastamento da fonte pode ser calculada, pela fórmula  $N_H = N_0 \cdot e^{-mH}$ , de forma aproximada, onde  $N_H$  representa a radiação à distância  $H$  da fonte,  $N_0$  a radiação na superfície do terreno ( $H=0$ ),  $m$  o coeficiente de atenuação atmosférica e  $H$  a altura medida.

- Conversão para Concentração de Elementos: a sensibilidade dos detectores para as janelas do potássio, urânio e tório foi determinada na fase de testes dos detectores, para que a conversão dos valores de contagem total para microR/h fosse obtida pela expressão  $E = 1,505 K + 0,653eU + 0,287eTh$ .

#### 4.5 Processamento de dados

Processos que resultam na formação de zonas de alteração hidrotermal que podem ter mineralizações associadas podem modificar a concentração original de radioelementos. Alguns tipos de alteração hidrotermal, tais como a potássica (com feldspato potássico ou biotita), sericítica, sericítica-cloritica ou fílica, podem ser importantes vetores para mineralizações. Nesse contexto, durante a alteração hidrotermal o  $K_{40}$  se associa facilmente ao K em relação aos outros radioelementos, tornando-se o principal emissor de raios gama e ideal para a identificação de zonas anômalas para esse elemento. Os dados de gamaespectrometria aérea e terrestre têm sido amplamente utilizados na prospecção mineral com sucesso nos últimos anos, como descrito nos trabalhos de Fornazzari *et al* (2001), Magalhães (2008), Pires (1995), Quadros *et al* (2003). Para Fornazzari *et al* (2001) este método possibilita a identificação de áreas hidrotermalmente alteradas, bem como explorar a relações destas com as mineralizações de ouro, prata e metais base.

Urânio e tório são os outros dois principais radioelementos, contudo, menos comuns nos fluidos mineralizantes.

Quadros *et al.* (2003) sugerem que em depósitos de ouro tipo lode orogenético ocorre tipicamente um enriquecimento em potássio, associado a valores médios de urânio, e baixos no canal do tório. Os métodos de processamentos dos dados gamaespectrométricos propostos, Pires (1995) e Saunders *et al.* (1987) tem como principal objetivo evidenciar a concentração anômala de potássio (Figura 4.4), são amplamente úteis descritos pela equação 4.1.

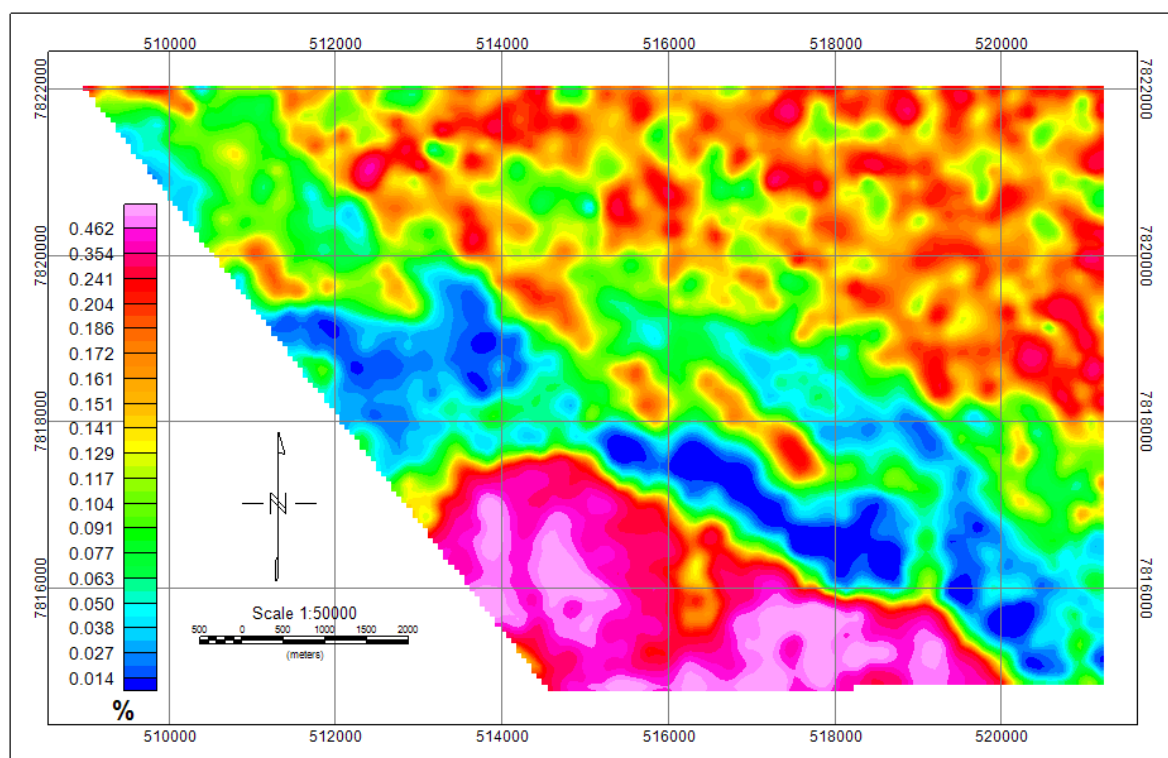
$$Kd = \frac{K - Ki}{Ki} \quad (\text{equação 4.1})$$

onde:

$$Ki = \frac{\text{valor médio de concentração de K}}{\text{valor médio de concentração de Th}} * Th \quad (\text{equação 4.2})$$

Desta forma o Kd (potássio anômalo) representa a concentração deste elemento devido aos processos de alteração hidrotermal. E o Ki corresponde ao valor ideal de *background* do potássio para a região (Quadros *et al.* 2003).

O mapa de potássio anômalo – Kd (Figura 4.4) evidencia uma porção de alta concentração deste elemento na porção norte-nordeste da área de estudo, não correspondendo portanto ao evento de alteração hidrotermal responsável pelos depósitos auríferos do Projeto Turmalina.



**Figura 4.4:** Mapa gamaespectrométrico de potássio anômalo (Kd). Os depósitos de ouro do Projeto Turmalina estão representados pelos pontos pretos.

Todos os depósitos do projeto turmalina apresentam valores muito baixos para a concentração de potássio. Este fato pode ser explicado quando se identifica os tipos de alteração hidrotermal associados com a mineralização aurífera de Turmalina que contêm em proporções variadas biotita, sericita e carbonato. Apesar das duas principais micas (biotita e sericita) da alteração possuírem potássio em sua composição, a concentração deste elemento não é suficiente para caracterizar uma anomalia.

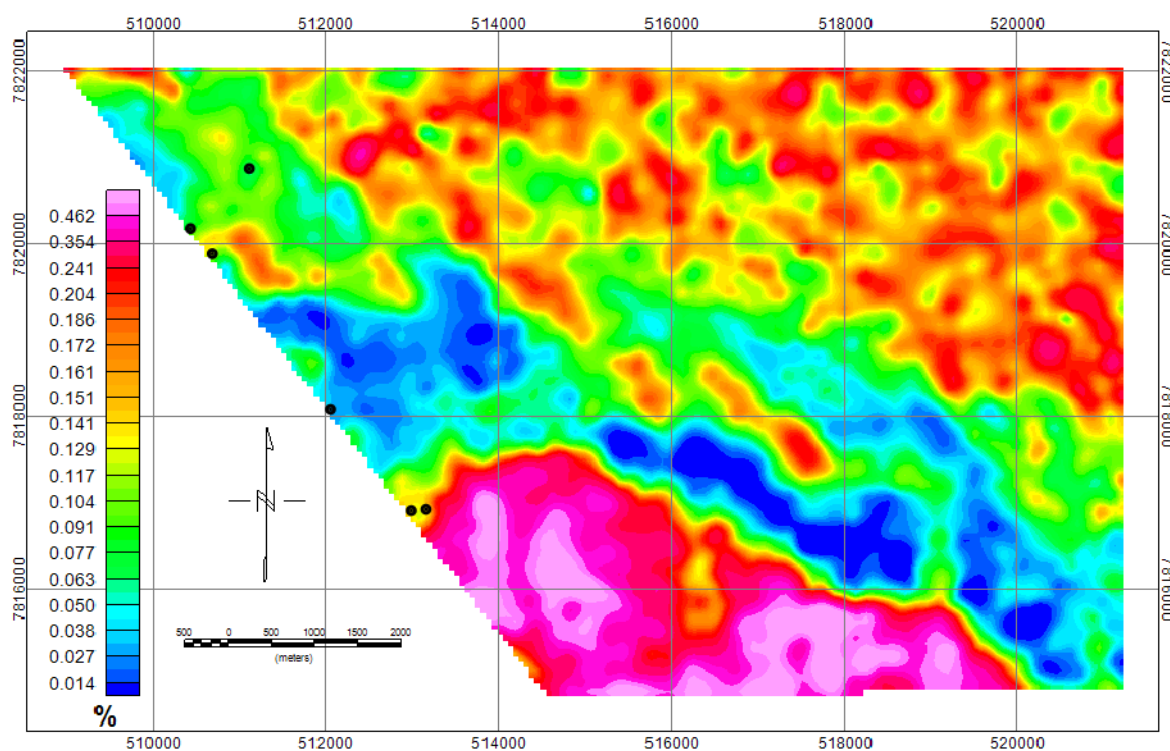
As anomalias negativas de potássio correspondem à área de exposição das unidades metavulcano sedimentar e meta-intermediaária. Essas unidades ocorrem alternadas ao longo

de faixas estreitas, delimitando anomalias negativas significantes não só na região de estudo como também em seu entorno.

Efimov (1978) propôs outro método de análise gamaespectrométrica baseada em duas importantes relações: (i) a abundância de K em relação a razão Th/U; e (ii) a abundância de U em relação a razão Th/K. O parâmetro proposto nesta ocasião foi chamado de Fator F (Figura 4.5) e é determinado pela equação 4.3.

$$F = \frac{K \times U}{\tau h} \quad (\text{equação 4.3})$$

Para aplicação das duas técnicas mencionadas anteriormente foi utilizado o Software Geosoft Oasis Montaj, e as principais ferramentas para combinação de grids (.grd), formato no qual a Codemig disponibilizou os dados os dados corrigidos finais de levantamento de gamaespectrometria.



**Figura 4.5:** Mapa gamaespectrométrico do fator F. Os depósitos de ouro do Projeto Turmalina estão respresentados pelos pontos pretos.

O mapa de fator F apresentado na figura 4.5 realça as áreas onde há maior concentração de potássio e urânio. Essas áreas coincidem pelo mapa geológico com áreas

onde afloram rochas do embasamento, como por exemplo na porção sul da área de estudo. De forma semelhante o enriquecimento de potássio na porção norte-nordeste devido a processos hidrotermais também se destaca.

As anomalias negativas no mapa de fator F são bastante semelhantes às do mapa de potássio anômalo (Kd) e correspondem as unidades meta-intermediária e emetavulcano sedimentar, sendo a primeira a responsável pelos principais picos negativos e hospedeira do depósito Faina.

Na figura 4.6 são apresentados os mapas de concentração para tório, urânio e potássio, bem como a composição ternária destes elementos. O gnaisse com anfibólio e biotita do complexo Divinópolis, no limite sul da área apresenta valores elevados nos três canais radiométricos.

O mapa ternário não só evidencia as conclusões até agora retiradas como situa os depósitos do Projeto turmalina em porções com baixíssimas concentrações destes radioelementos.

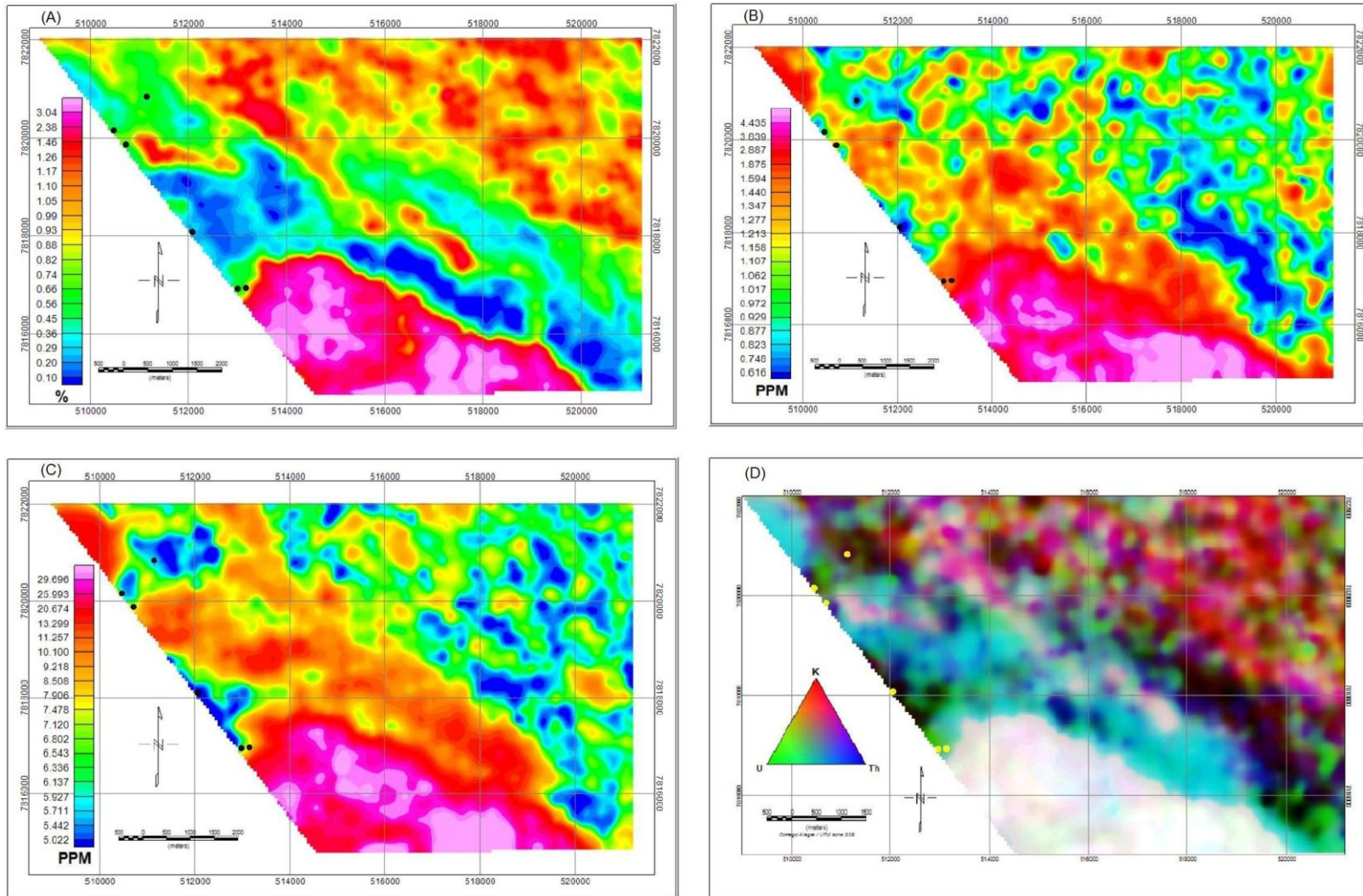


Figura 4.6: Mapas gamaespectrométricos da distribuição dos elementos (A) Potássio, (B) Urânio e (C) Tório, os depósitos auríferos estão representados em preto. (D) Mapa ternário em RGB - K, U, Th, os depósitos auríferos estão representados em amarelo.

## CAPÍTULO 5 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ESPECTRAIS

A espectroscopia de reflectância é uma técnica analítica utilizada desde o século dezanove por químicos e mineralogistas para a identificação de compostos químicos orgânicos e inorgânicos. Atualmente, com a evolução dos equipamentos e softwares disponíveis, aliados às extensas bibliotecas espectrais de referência, a utilização desta técnica tornou-se rápida e acessível (Pontual *et al.* 2008).

Os fenômenos de reflexão e absorção de energia eletromagnética pelos diferentes materiais nas regiões do visível-infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) fornecem informações importantes acerca da composição dos mesmos (Thompson 1999). Os equipamentos de espectroscopia de reflectância registram o espectro refletido pelo material. Através da análise comparativa dos espectros obtidos com os espectros das bibliotecas de referência é possível determinar os componentes do material (Pontual *et al.* 2008).

As feições mais importantes no espectro captado pelo equipamento são os picos de absorção de energia. A porção do espectro eletromagnético (EEM) que fornece importantes informações para o estudo mineral está situada entre 700 e 2500 nm. Embora nem todos os minerais e rochas exibam características espectrais diagnósticas nesses intervalos de comprimento de onda, existe um grande número de minerais de interesse às atividades exploratórias que possuem tais características, figura 5.1 (Sabine 1999).

Para a aquisição dos dados por este método não é necessária qualquer preparação das amostras. Além disso, a espectroscopia de reflectância se destaca por ser uma técnica não destrutiva (Clark 1999). Foram analisadas 48 amostras, sendo obtidos três espectros para cada uma. Em seguida os espectros de cada amostra foram avaliados, com o objetivo de determinar quais possuíam menor ruído e feições de absorção mais proeminentes.

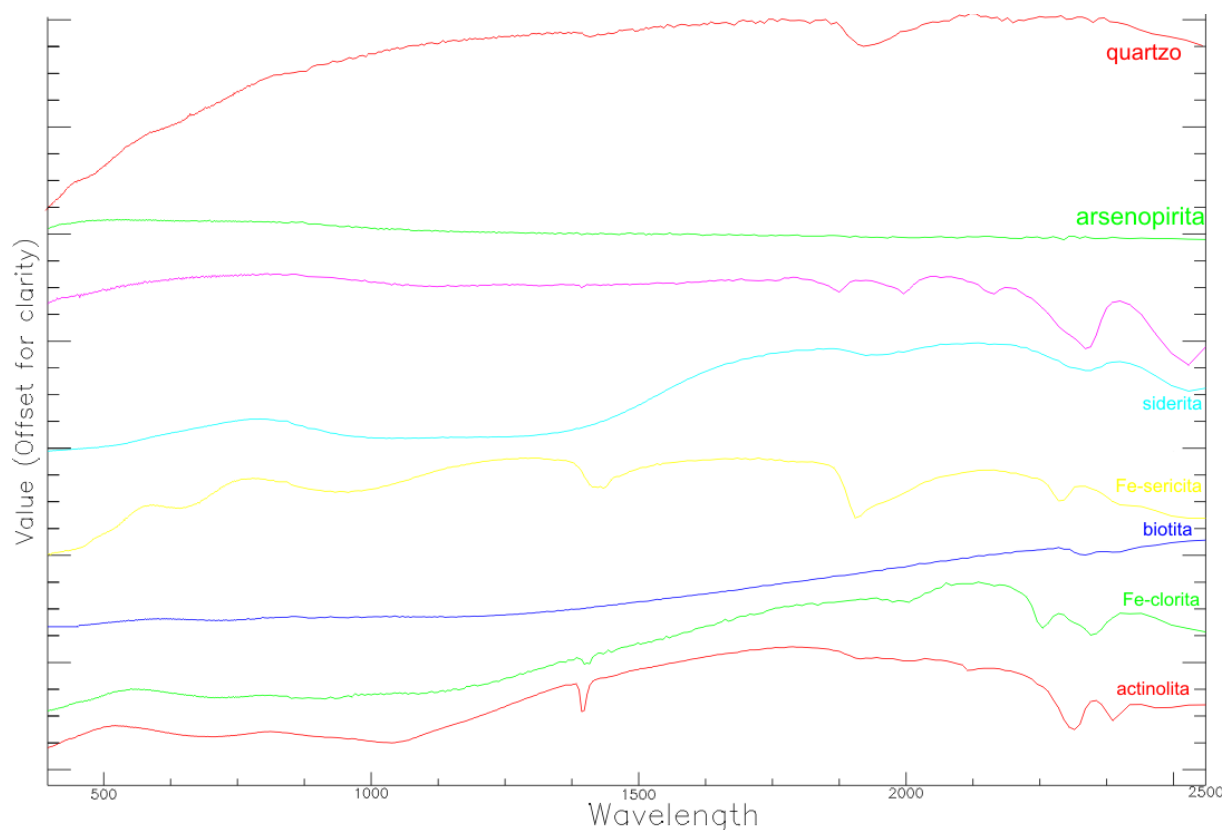
O espectroradiômetro *FieldSpec 3 High Resolution* foi utilizado para obtenção dos dados espectrais. Este equipamento caracteriza-se por abranger um intervalo espectral entre 350 e 2500 nm. Apresenta alta resolução espectral de 3,0 nm, 8,5 nm e 6,5 nm para os intervalos do visível, NIR e SWIR respectivamente. Para facilitar a obtenção dos dados o uma sonda de contato com fonte própria de iluminação da amostra, com tempo de aquisição de aproximadamente 1/10 de segundo por espectro (ASD Inc. 2011).

As principais feições espectrais de absorção distinguidas na região do SWIR estão associadas a variações de transição molecular devida à presença da molécula hidroxila (O-H) e/ou água, além de importantes feições de absorção espectrais obtidas por vibrações nas

ligações entre elementos químicos como Al-OH, Mg-OH e Fe-OH (Tabela 5.1). Essas moléculas estão presentes na maioria dos filossilicatos (argilominerais, clorita e serpentina), sulfatos (alunita e gipso) e carbonatos (Pontual *et al.* 2008).

**Tabela 5.1: Intervalos de comprimentos de onda nos quais ocorrem as feições de absorção espectral características das moléculas OH, água, Al-OH, Fe-OH, Mg-OH e CO<sub>3</sub>.**

Moléculas	Comprimento de onda das feições de absorção características
OH	~1400 nm (também ~ 1550 nm e ~1750-1850 nm em alguns minerais)
Água	~ 1400 nm e ~ 1900 nm
Al-OH	~ 2160-2220 nm
Fe-OH	~2230-2295 nm
Mg-OH	~2300-2360 nm
CO <sub>3</sub>	~2300-2350 nm (e também em 1870 nm, 1990 nm e 2155 nm).



**Figura 5.1: Espectro de reflectância (assinatura espectral) dos principais minerais presentes nos depósitos do Projeto Turmalina, Pitangui - MG, mostrando as bandas de absorção espectral que os caracterizam (Fonte: USGS Digital Spectral Library - ENVI 4.2)**

### 5.1 Processamentos dos dados e discussões

O software ENVI foi empregado para a seleção dos melhores espectros bem como para a criação da biblioteca espectral do projeto. A partir desta biblioteca espectral foi



utilizado o software SIMS para compará-los com a biblioteca de referência disponibilizada pela USGS.

A identificação dos minerais a partir da identificação dos principais picos de absorção da amostra, e pesquisa na biblioteca espectral da USGS lista os minerais que apresentam cada um destes picos. Como diversos minerais possuem picos em intervalos de comprimentos de onda semelhantes é necessário comparar todo o espectro, tendo em vista que a quase totalidade dos minerais apresenta mais de um pico de absorção.

Segundo Meneses e Madeira Netto (2001) todas as feições de absorção que aparecem em comprimentos de onda menores que 1200 nm, em rochas hidrotermalmente alteradas correspondem às transições eletrônicas dos íons de ferro (Fe), presentes nas fases de óxidos/hidróxidos. Por isto esta região não é considerada favorável para a identificação de minerais hidrotermais. Ela é utilizada, contudo, para identificar minerais portadores de ferro produzidos pela alteração secundária (supergênica) de sulfetos, principalmente da pirita. Desta forma as principais feições de comprimentos de onda superiores a 1200 nm devem-se às transições vibracionais do grupo hidroxila e são amplamente utilizados para a identificação de materiais geológicos. Os diferentes minerais possuem espectros semelhantes, mas são diferenciados a partir da quantidade de características como: intensidade e largura das feições de absorção, número de feições por espectro e existência de múltiplas feições na banda.

Os gráficos apresentados a seguir não apresentam as intensidades reais de reflectância medidas nas amostras, uma vez que os espectros foram separados verticalmente para que não haja sobreposição, facilitando assim a identificação dos minerais correspondentes da cada pico de absorção.

### **5.1.1 Pontal**

Foram coletadas no depósito do Pontal cinco amostras em diferentes trincheiras, pois este corpo ainda não é explorado economicamente. A rocha hospedeira são metatufos, metalapili tufos e metaconglomerados, compostos por biotita, sericita, clorita, quartzo, plagioclásio, carbonato, rutilo e apatita. Sendo os níveis silicificados e carbonatados a região mineralizada, a concentração destes compostos diminui gradativamente, assim como o teor de ouro, indicando comportamento permeável da hospedeira.

A principal diferença entre os espectros (Figura 5.2) de minério e estéril foi encontrada entre os comprimentos de onda 2150nm e 2350nm, onde se localizam as principais feições

de absorção das micas. No minério foi identificado neste intervalo o mineral muscovita/ilita, enquanto no estéril encontra-se gibbsita, caulinita e esmectita.

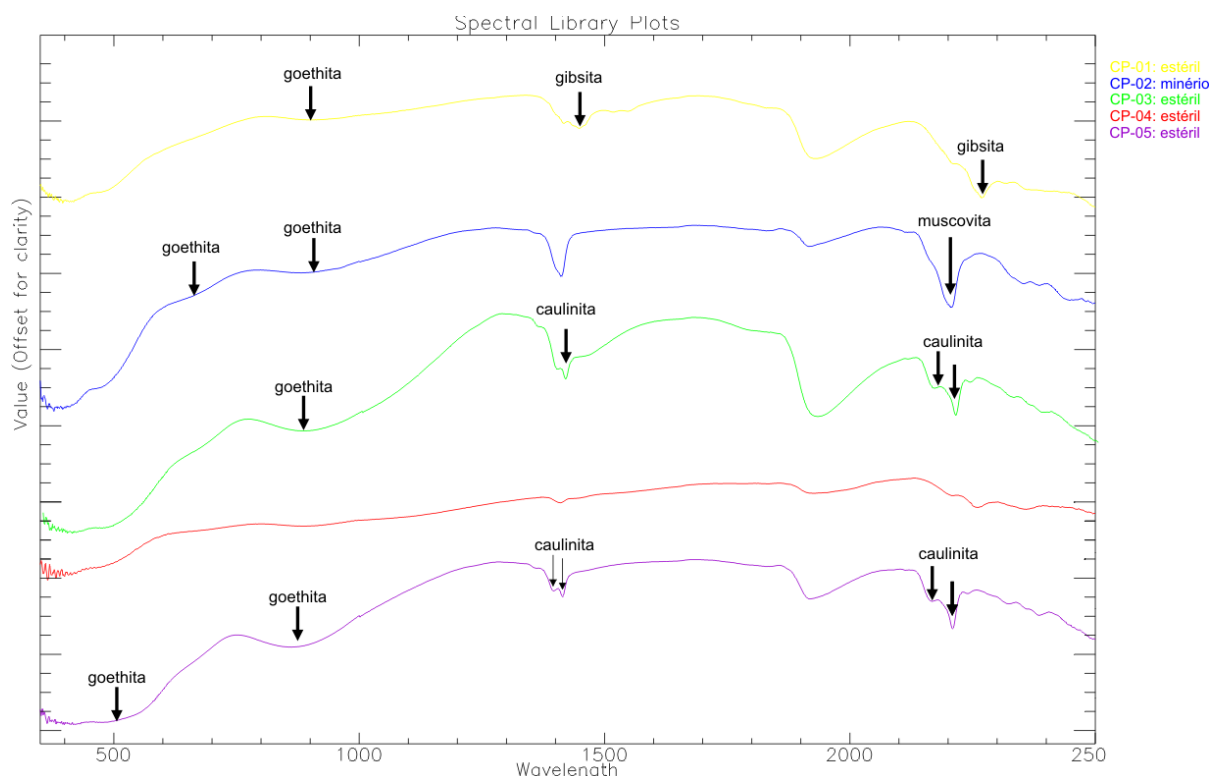


Figura 5.2: Amostras coletadas em trincheiras e cortes de estrada, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.

### 5.1.2 Faina

Neste depósito foram coletadas oito amostras de rocha alterada, dentro e nas imediações da cava a céu aberto. A rocha encaixante nesta região varia entre anfibolitos e anfibólio-biotita-clorita xistos, e as porções mineralizadas destas rochas possuem adicionalmente carbonato, sílica e sulfetos.

Os principais minerais identificados a partir da análise espectral (Figura 5.3) foram caulinita, esmectita, montmorilonita, óxidos de ferro e clorita. Todos os minerais, com exceção da clorita, são secundários resultantes de processos de alteração intempérica das rochas

Neste depósito a alteração hidrotermal da zona mineralizada é descrita como carbonática por Takai *et al.* (1991); no entanto não foi identificado nenhum tipo de carbonato nas amostras analisadas. Devido ao grau de alteração intempérica do material e a alta solubilidade dos carbonatos, estes minerais provavelmente já foram substituídos por outros mais estáveis às condições climáticas da região.

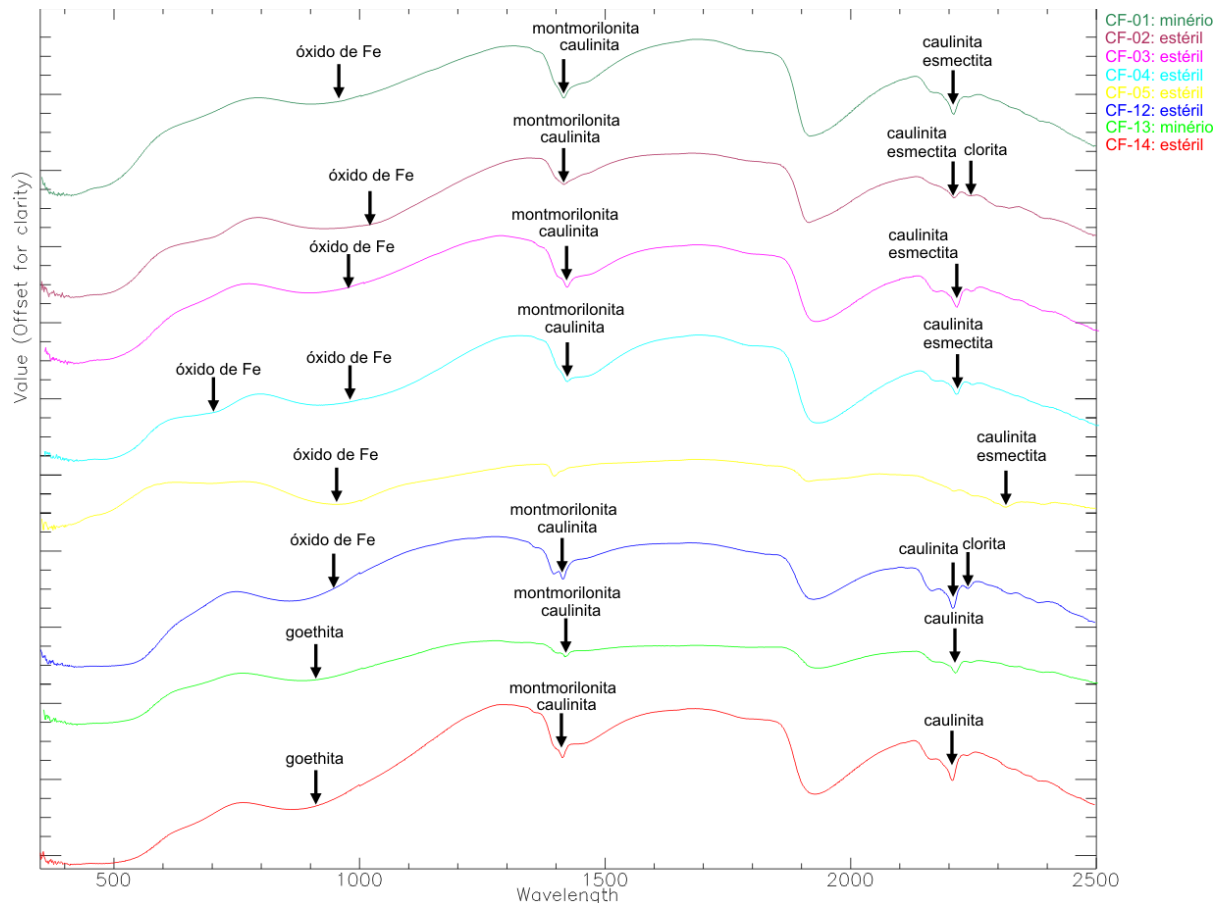


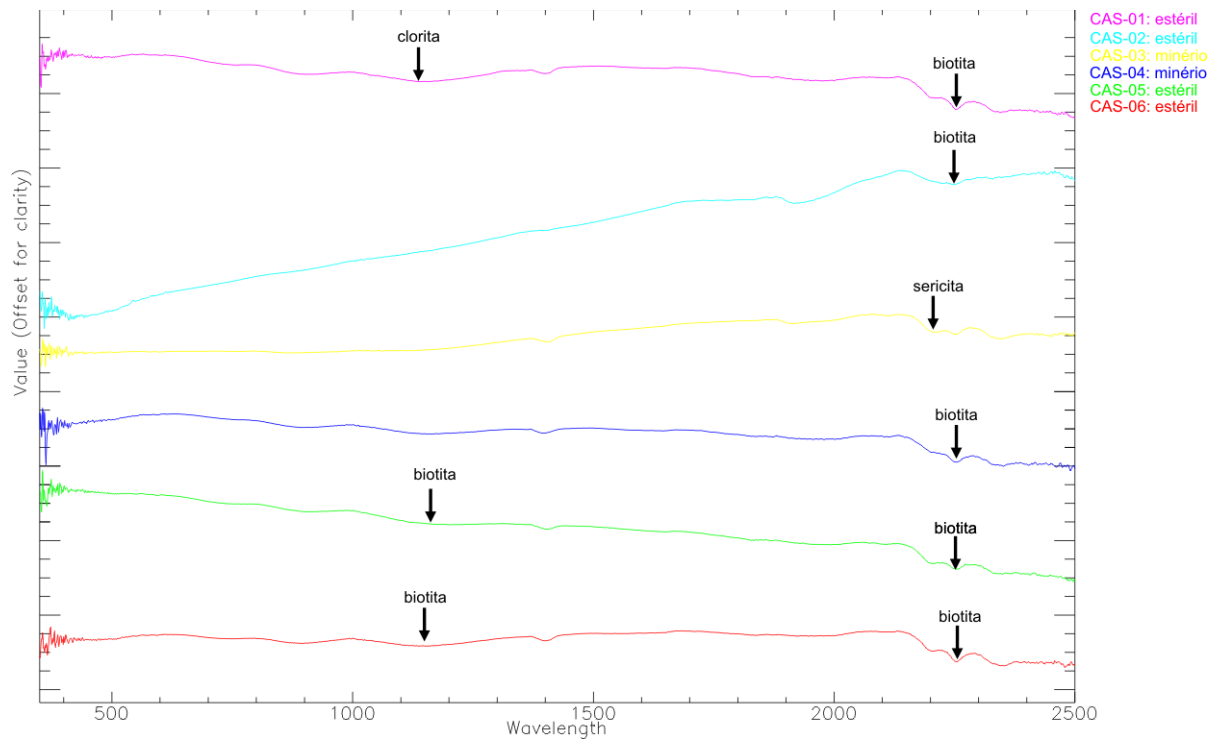
Figura 5.3: Espectros coletados em duas cavas da mina a céu aberto, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.

### 5.1.3 Morro da Turmalina

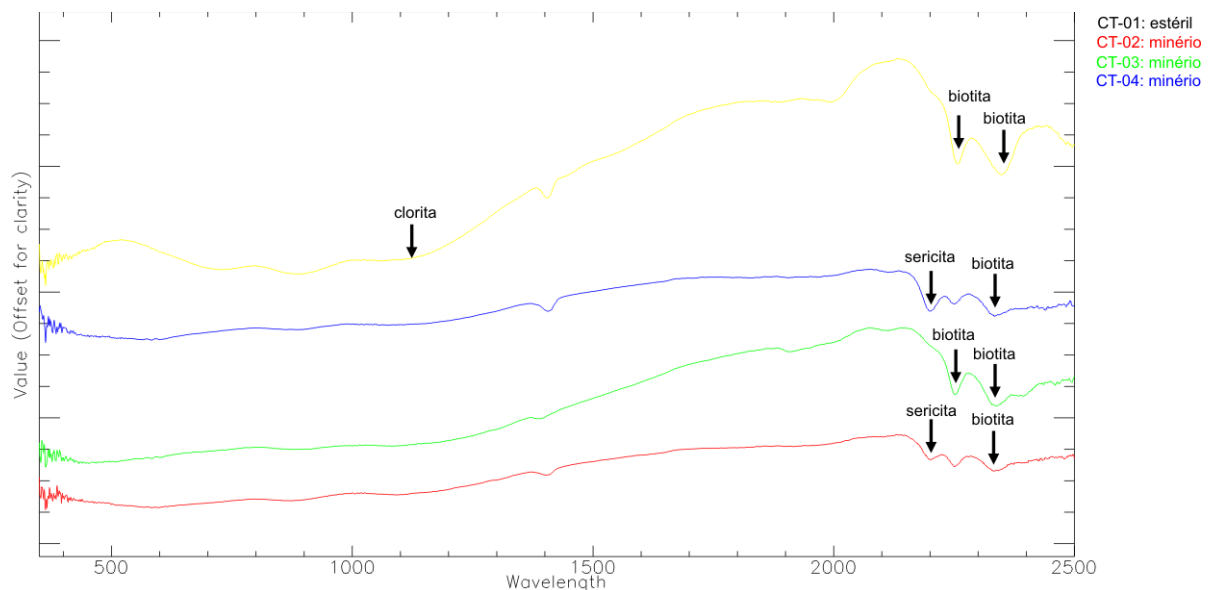
- **Corpo A**

Foram coletadas neste depósito dez amostras, sendo seis de um testemunho de sondagem e quatro coletadas diretamente na mina de subsolo. Neste corpo existem dois tipos de minério sendo que o primeiro e de mais alto teor é definido como quartzo-biotita xisto com sulfetos e o segundo biotita xisto com sulfetos disseminados; a rocha encaixante é um biotita xisto.

Os espectros obtidos a partir das amostras coletadas no testemunho de sondagem estão representados na figura 5.4, enquanto os espectros das amostras coletadas dentro da mina subterrânea estão na figura 5.5.



**Figura 5.4:** Espectros obtidos a partir das amostras coletadas no furo de sondagem, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.



**Figura 5.5:** Espectros obtidos a partir das amostras coletadas na mina subterrânea, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.

As rochas encontradas neste depósito são basicamente compostas por filossilicatos. Seus espectros são pouco intensos o que dificulta a identificação dos minerais. Segundo Meneses e Madeira Neto (2001) quando se trata de minerais as principais informações

estarão concentradas entre 2000 nm e 2500; no entanto a partir de 2350nm o espectro apresenta muito ruído e não fornece informações seguras.

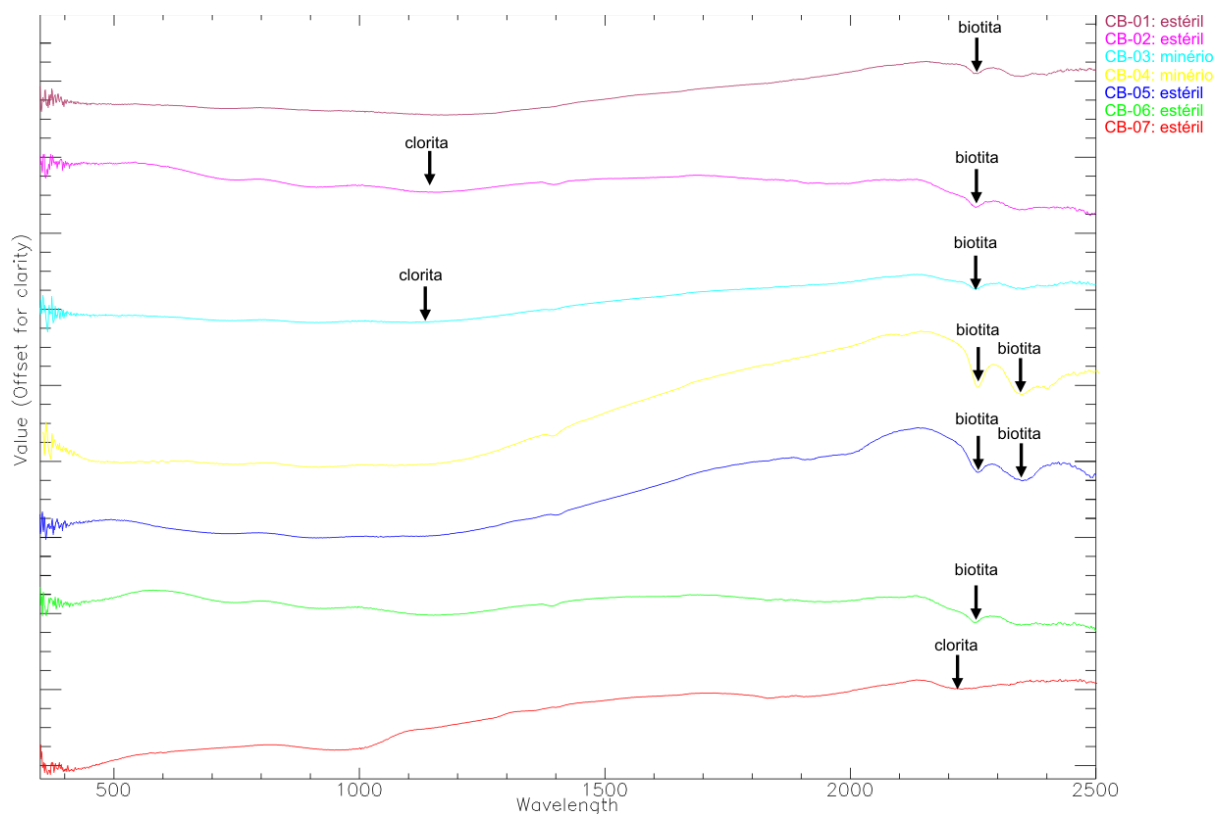
A partir dos espectros obtidos foi possível identificar três minerais: a biotita é o mineral predominante, seguido por sericita e clorita que foi identificada apenas em duas amostras de estéril. Não foi possível a identificação de um mineral que diferencie estéril de minério, contudo, a ausência de carbonato nos espectros corrobora os dados da bibliografia.

- **Corpo B**

Foram coletadas sete amostras ao longo de um testemunho de sondagem. O minério é descrito como um quartzo-biotita xisto e o estéril é um biotita xisto. Ele se diferencia do corpo A pela presença de granada em porções variáveis dentro e fora da zona mineralizada.

Nos espectros representados na figura 5.6 estão representados os picos de absorção diagnósticos dos minerais presentes no corpo B. Neste corpo, ao contrário do corpo A, não foi identificada sericita e a clorita foi identificada em uma amostra do minério. A biotita continua sendo o mineral predominante. Mesmo nas amostras com granada visível não foi possível identificá-la nos espectros. Assim como no corpo A, neste também não foi identificado carbonato.

Considerando as informações obtidas nos espectros das rochas do depósito Morro da Turmalina, constata-se que este depósito possui altas concentrações de biotita e sericita, sendo que a clorita está presente em amostras isoladas. Como descrito na literatura este depósito não possui carbonato. Este método possibilitou a identificação dos principais minerais que o constituem, mas nenhum dos minerais identificados pode ser considerado como mineral índice do minério, pois ocorrem dentro e fora da zona mineralizada. Na Mineração Turmalina, dois minerais são utilizados como farejadores do ouro, o quartzo e a arsenopirita. O primeiro pois, o principal processo de alteração hidrotermal da zona mineralizada é silicificação, e a arsenopirita pois o ouro está incluso ou associado a este mineral. A figura 5.1 mostra os espectros destes minerais, sendo que a arsenopirita não apresenta feições relevantes, enquanto os principais picos de absorção do quartzo ocorrem na região do espectro eletromagnético denominada TIR, que não coberta pelo espectroradiômetro utilizado.



**Figura 5.6:** Espectros obtidos a partir das amostras coletadas no furo de sondagem, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.

#### 5.1.4 Fazenda Experimental

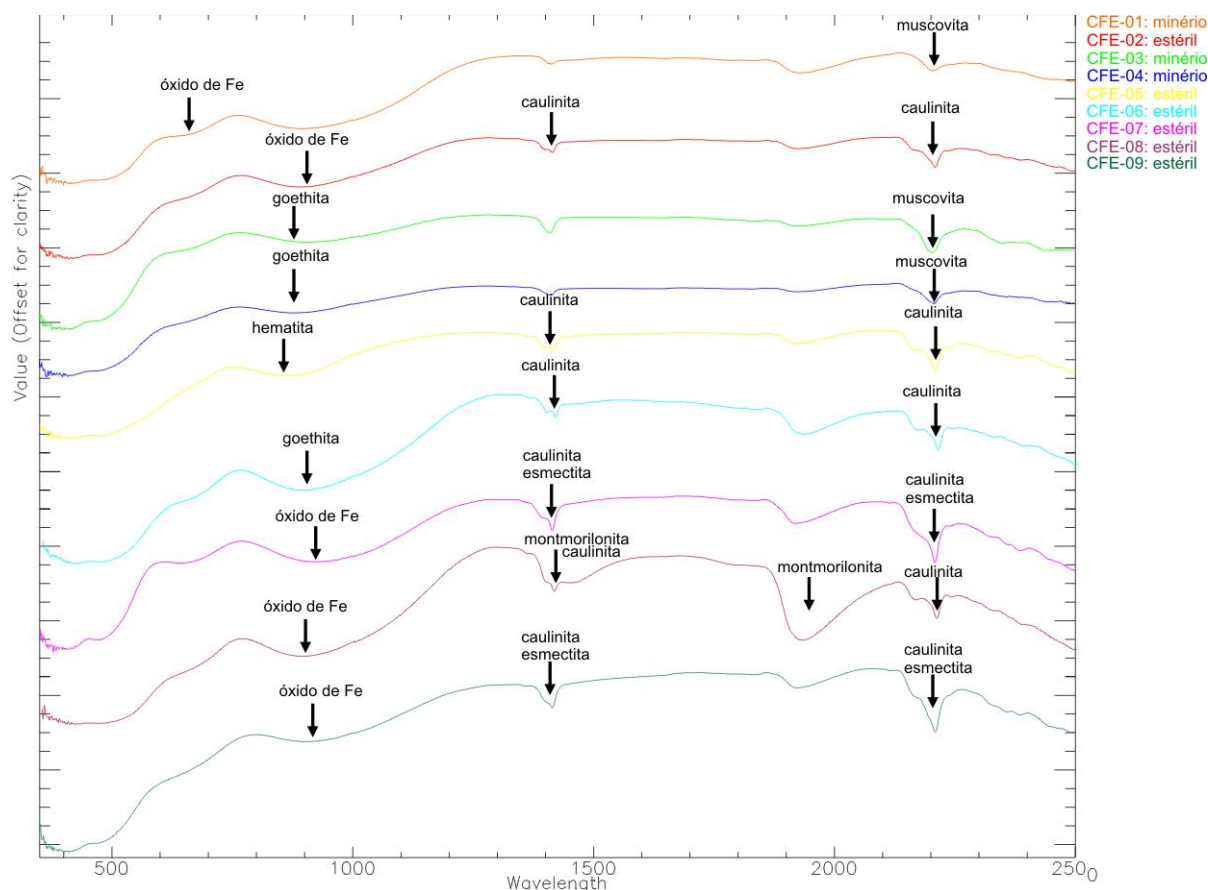
Foram coletadas nove amostras em trincheiras abertas pela Mineração Turmalina, ou em cortes na beira das estradas de acesso à região. A rocha é descrita como um filito de coloração vermelha, sendo as porções mineralizadas amarelas. Essa mudança na cor da rocha/solo, semelhante aos corpos Faina e Pontal, está associado aos processos de carbonatação.

A espectroscopia de reflectância possibilitou a identificação dos principais minerais presentes no minério e estéril, que possuem feições espectrais no intervalo analisado. Os principais minerais encontrados são minerais secundários resultantes de processos intempéricos, tais como, caulinita, esmectita, montmorilonita e óxidos de ferro. Meneses e Madeira Netto (2001) salientam a dificuldade do relacionamento destes minerais com aqueles encontrados na rocha sã, quando se tem acesso a ela.

Do conjunto de depósitos do Projeto Turmalina somente o membro Morro da Turmalina não possui registros de carbonatação; contudo, com a utilização da espectroscopia de reflectância não foi encontrado carbonato nas amostras. Duas situações podem explicar sua ausência: i – devido à alta solubilidade dos carbonatos, estes são

facilmente lixiviados nos processos intempéricos; ii – baixa concentração de carbonato nas amostras coletadas, pois a intensidade do espectro e picos de absorção também está relacionada à concentração do mineral na rocha.

A principal diferença entre os espectros (Figura 5.7) de minério e estéril foi encontrada entre os comprimentos de onda 2150nm e 2350nm, onde se localizam as principais feições de absorção das micas. No minério foi identificado neste intervalo o mineral muscovita/ilita, enquanto no estéril encontra-se caulinita e esmectita.



**Figura 5.7:** Amostras coletadas em trincheiras e cortes de estrada, deslocados verticalmente para facilitar a individualização de cada espectro e a representação dos minerais correspondentes a cada pico de absorção.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Foram utilizados três diferentes métodos de investigação geológica indireta: sensoriamento remoto, aerogeofísica e espectroscopia de reflectância. Os dois últimos mostraram-se úteis para a caracterização dos depósitos auríferos do Projeto Turmalina, enquanto o primeiro não apresentou resultados relevantes. Diferentes fatores como a presença de intensa vegetação, nuvens e reduzida dimensão dos corpos mineralizados, podem condicionar a utilização do sensoriamento remoto que, aplicado a este depósito, mostrou-se pouco eficaz.

Ao contrário do que se pretendia, não foi possível identificar os depósitos auríferos da região de Pitangui por meio do sensoriamento remoto. Contudo, os dados de geofísica e espectroscopia de reflectância propiciaram a caracterização dos depósitos.

Por outro lado, a utilização da imagem ASTER, em conjunto com o modelo digital de elevação, propiciou a identificação de diversas estruturas geológicas presentes na região de Pitangui e Onça de Pitangui. Esta foi, portanto, a principal contribuição do método de sensoriamento remoto para os objetivos do presente trabalho.

Os cinco depósitos auríferos do Projeto Turmalina - Morro da Turmalina, Satinoco, Faina, Pontal e Fazenda Experimental - são hospedados por diferentes litotipos e apresentam alteração hidrotermal variável entre sericítica, carbonática e biotítica. Apesar do depósito Morro da Turmalina diferenciar-se pela ausência de carbonato, a forma de ocorrência das mineralizações é bastante semelhante, sendo que os corpos mineralizados em ouro podem estar disseminados em veios de quartzo alongados ou em charneiras de dobras.

Os dados de gamaespectroscopia evidenciam o diferente comportamento da concentração de radioelementos entre os depósitos, como também deixa claro o comportamento anômalo daquela região quando comparados aos depósitos tipo “lode” orogénico clássicos. Nos mapas de anomalias de potássio (Kd) e do Fator F (potássio e urânio) são individualizadas duas áreas de maior concentração destes elementos, provavelmente relacionadas a processos de alteração hidrotermal e a rochas do embasamento.

As principais anomalias de potássio da região de estudo localizam-se na porção norte-nordeste da área, não corresponde à localização dos depósitos auríferos. Mas levando em consideração o padrão regional de orientação e deformação das rochas, esta anomalia pode estar relacionadas ao processo de geração dos agalmatolitos. Na região dos municípios de Onça de Pitangui e Pará de Minas, situadas a sudeste de Pitangui, são exploradas diversas



minas de agalmatolito (rocha peraluminosa composta por pirofilita, muscovita, caulinita, diásporo, cianita, turmalina, quartzo e feldspato). Todavia, não há na literatura uma relação entre a gênese dos depósitos de ouro e agalmatolito e o mapa de potássio anômalo evidência as diferentes características das rochas próximas aos dois tipos de depósitos.

A espectroscopia de refletância possibilitou a identificação dos minerais presentes nas amostras que possuem feições diagnósticas no intervalo Vis-NIR-SWIR. Com isso pode-se obter um conhecimento maior do comportamento espectral do substrato daquela região e identificar alguns dos minerais que compõem o minério oxidado, chamado genericamente de “hidrotermalito” nos relatórios internos da Jaguar.

Não foi identificado carbonato em nenhuma dos espectros analisados. No entanto, isto não contradiz a literatura quanto à associação de processos de carbonatação aos depósitos Faina, Pontal e Fazenda Experimental. Nestes depósitos foram analisadas amostras de solo ou rocha alterada, nas quais os minerais identificados são predominantemente secundários. Essa condição do substrato é condicionada pelas condições climáticas da região. Em solos formados em climas quentes e úmidos como na região de Pitangui, a alta solubilidade do carbonato faz com que ele seja rapidamente substituído, em geral pela goethita.

A ausência de carbonato nos espectros do depósito Morro da Turmalina reflete a carência real deste mineral, pois os espectros foram obtidos a partir de amostras de rocha fresca.

Nos depósitos Pontal e Fazenda Experimental foi possível identificar diferenças nas feições dos espectros de minério e estéril. Nas amostras de estéril o mineral principal é caulinita, enquanto no minério é a muscovita. Esta diferenciação não reflete uma mudança composicional entre minério e estéril, mas evidencia o diferente comportamento de ambos em relação aos mesmos processos intempéricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensin.*, 21(5): 847-861.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Craton de São Francisco. *Rev. Bras. Geociências*, 7 (4): 349 – 364
- Alkmim, F.F.; Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29 – 58
- ASD – Analytical Spectral Devices Inc: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-hi-res-portable-spectroradiometer> (consultado em jul. 2011).
- Babinski, M.; Schumus, W.R.V. ; Chemale Jr, F. 1999. Pb-Pb dating and Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic carbonate rocks from the São Francisco basin, Brazil: Implications for the mobility of Pb isotopes during tectonism and metamorphism. *Chemical Geology*, 160: 175-199
- Campos, W.F.; Duchini Jr, J.; Frizzo, C. 2008. *Projeto Ouro Turmanlina: Alvo Satinoco. Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais – Brasil*. In: Simexmin, 03, Ouro Preto.
- Cardoso, D. B. 2009. *Estudo da alteração hidrotermal e supergênica do depósito de cobre pórfiro El Salvador - Chile, usando sensoriamento remoto multiespectral e hiperespectral*. Inst. Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 52 p.
- Clark, R.N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz, A.N. (ed), *Remote Sensing for Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons Inc., New York, pp: 3-58
- CPRM. 2011. Excursão Virtual pela Estrada Real no Quadrilátero Ferrífero – Aspectos Geológicos: [http://www.cprm.gov.br/estrada\\_real/geologia\\_estratigrafia.htm](http://www.cprm.gov.br/estrada_real/geologia_estratigrafia.htm) (consultado em maio de 2011)
- Crósta A.P.; Moore J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 07, Calgary, Canadá, *Proceedings*, 2: 1173-1187
- Crósta A.P.; Souza Filho C.R.; Azevedo F.; Brodie C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 24 (21): 423-4240
- Crósta, A.P.; Prado, I.D.M.; Obara, M. 1996. The use of Geoscan AMSS data for gold exploration in the Rio Itapicuru Greenstone Belt (BA, Brazil). In: ERIM Thematic Conference on Geological Remote Sensing, 11, Las Vegas, *Proceedings*, 11: 205 -214
- Ducart, D. F. 2004. *Caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e*

- espectroscopia de reflectância*. Inst. de Geociências, Universidade de Campinas, Dissertação de Mestrado, 86 p.
- Ducart, D. F. 2007. *Alteração Hidrotermal do Prospecto Cerro de La, Los Menucos, Patagônia Argentina: Geologia, Sensoriamento Remoto, Isótopos Estáveis*. Inst. de Geociências, Universidade de Campinas, Tese de Doutorado, 174 p.
- Ebert, HD. 1997. *Structural Geology of Turmalina Mine 1 – Pitangui Project Brazil*. Rio Claro, Unesp, 16 p.
- Efimov A.V. 1978. Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado, Naucnoproizvodstvennoje objedinenie Geofizica Ed., 59-68
- Faure G. 1997. *Principles and applications of geochemistry*. Nova Iorque, Prentice Hall, 589 p.
- Fornazzari, L.N.; Ferreira, F.J.F.; Ccampos, A.F. 2001. Gamaespectrometria aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá-SC. In: *Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, 7, Salvador. *Proceedings*, 621-624
- Frizzo, C.; Takai, V.; Scarpelli, W. 1991. Auriferous mineralization at Pitangui, Minas Gerais. In: E.A. Ladeira (ed.) *Brazil Gold'9*, Rotterdam, AA Balkema, *Proceedings*, 579-583
- Gair, J.E., 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles Minas Gerais, Brazil. *United States Geological Survey Professional Paper* 341(A)1-67
- Geobank, CPRM. 2011. Grupo Nova Lima: [http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.website.inicial?p\\_webmap=N](http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.website.inicial?p_webmap=N) (consultado em junho de 2011).
- Heineck, C.A. 1997. *Geologia e mineralizações do Greenstone Belt Rio das Velhas na região de Mateus Leme, Minas Gerais*. Inst de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 154 p.
- Jensen, J.R. 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 2 ed. Englewood-Cliffs, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, 316 p
- King, L.C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, 18(2): 265
- Ladeira, E.A. 1981. Primeiras lavas com almofadas (“pillow”) encontradas no Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, no Quadrilátero Ferrífero e no Distrito de Pitangui, Minas Gerais. *Ciências da Terra*. 1 (1): 12-14
- Loughlin W.P. 1991. Principal Component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 57(9):1163-1169
- Magalhães, L.A. 2008. *Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações airíferas na região de Amapari – Amapá*. Inst. de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 120 p.
- Martinez, M.I. 2007. *Estratigrafia do Grupo Bambuí no norte do Vale do Rio São Francisco, MG*. Inst. de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 122 p.

- Meneses, P.R.; Madeira Netto, J.S. 2001. *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília, DF: UNB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 262 p.
- Menezes Filho, N.R., Mattos, G.M.M.; Ferrari, P.G. 1977. Projeto Três Marias. MME/DNPM/CPRM. Rel. Final: 6 v.
- Miranda, J.M.A. 2005. *Introdução ao geomagnetismo*. Lisboa. Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, 103p.
- Noce, C.M.; Machado, N.; Teixeira, W. 1994. O complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais. In: ABG/Congresso Brasileiro de Geologia, 38., Camboriú, *Boletim de Resumos expandidos*.
- Noce, C. M. ; Teixeira, W. ; Machado, N. 1997. Geoquímica dos Gnaisses Ttgs e Granitóides Neoarqueanos do Complexo Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Rev. Bras. Geociências*, 27(1): 25-33
- Pires, A.C.B. 1995. Identificação Geofísica de Áreas de Alteração Hidrotermal. Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(1):61-68
- Pontual, S.; Merry N. J.; Gamson, P. 2008. *GMEX spectral analysis guide for mineral exploration. 3 ed.* Auspec International Publications. Vol. 1-10,
- Prado, I.D.M.; Crósta, A.P. 1997. Evaluating Geoscan AMSS Mk-II for gold exploration in the Fazenda Maria Preta District, Rio Itapicuru greenstone belt, Bahia State, Brazil. *Boletim IG-USP*, 28: 63–84
- Quadros, T.F.P.; Koppe, J.C.; Strieder, A.J.; Costa, J.F.C.L. 2003. Gamma-ray data processing and integration for lode Au deposits exploration. *Natural Resources Research*, 12(1): 57-65
- Romano A.W. 1989. *Evolution Tectonique de la région Nord-Ouest du Quadrilatère Ferrifère - Minas Gerais-Brésil*. CRPG-CNRS, Université de Nancy I, Vandoeuvre-lès-Nancy - France, Tese de Doutorado, 259 p.
- Romano, A.W. 1993a. O Supergrupo Rio das Velhas da Faixa Mateus Leme-Pitangui – parte meridional do Cráton de São Francisco, MG - e seu sistema de alteração hidrotermal. *Geonomos*, 1(1): 16-32
- Romano, A.W. 2007. *Geologia da Folha Pará de Minas- SE.23-Z-C-IV, escala 1:100.000: nota explicativa*. Minas Gerais, UFMG/CPRM, 65 p.
- Romano, A.W.; Noce, C.M. 1995. Feições Estruturais do Lineamento Pitangui-Congonhas. In SBG/ SNET, 05, Gramado, *Anais*, 76-77
- Romano, A.W.; Paiva, C.T. 1997. Evolução de eventos tectônicos, metamórficos e de alteração hidrotermal ao longo de uma zona de cisalhamento: exemplo do Lineamento Pitangui, parte meridional do Cráton do São Francisco, MG. In: SBG/SNET 6, Pirenópolis, *Anais*, 21-22

- Rowan, L.C.; MARS, J.C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84: 350–366
- Sabine, C. 1999. Remote Sensing Strategies for Mineral Exploration. In: A.N. Rencz (ed.), *Remote Sensing for Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., 375-447
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14: 157–183
- Saunders, D.F.; Terry, S.A.; Thompson, C.K. 1987. Test of Nacional Uranium Resource Evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 52(11):1547-1556
- Secco, P R. 2009. *Caracterização dos tipos de agalmatolito da Serra dos Ferreiras, Onça de Pitangui-MG*. Inst. Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 101 p.
- Sgarbi, G.N.C.; Tuller M.P.; Ribeiro J.H.; Martins-Neto, M.A. 2003. The Carranca Facies and the Sete Lagoas Formation: the record of the Neoproterozoic snowball Earth glaciation in the Bambuí Group, São Francisco Basin. In: Simp. Geol. de Minas Gerais, 12, Ouro Preto, *Anais*, 1: 30-30.
- Souza Filho, C.R.; Tapia Calle C.H.; Crósta, A.P.; Xavier, R.P. 2003. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. In: Annual Conference of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), *Proceedings*, 1-12
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E.; Keys, D.A. 1990. *Applied geophysics*. 2 ed. Nova Iorque, Cambridge University Press, 770 p.
- Teixeira, N.A.; Kuyumjian, R.M. 1991. The Mateus Leme -Pitangui hydrothermal zone: Do they represent a fossil hot spring system in the Rio das Velhas greenstone belt, Central Brazil? In: E.A. Ladeira (ed) *Brazil Gold '91*. Rotterdam, A.A. Balkema, 171-177
- Ussami, N.; Kolisnyk, A.; Raposo, M.I.B.; Ferreira, F.J.F.; Molina, E.C.; Ernesto, M. 1991. Detectabilidade magnética de diques do arco de Ponta Grossa: Um estudo integrado de Magnetometria terrestre/aérea e magnetismo de rocha. In: Rev. Bras. Geociências, 21(4): 317-327
- Vieira, F.W.R. 1988. Processos epigenéticos de formação dos depósitos auríferos e zonas de alteração hidrotermal do grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SBG, Cong. Bras. Geologia, 35, Belém, *Anais* 1:76-87
- Zacchi, E.N.P.; Silva, A.M.; Toledo, C.L.B.; Cardoso, D.B.; Souza Filho, C.R.S. Integração de dados aerogeofísicos e do sensor ASTER no mapeamento geológico e seleção de alvos para prospecção mineral da região de Itapeçerica, MG. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis, *Anais*, 2216-2222

Zagato. 2011. Apostila sobre Atenuação de Raios Gama. [apostilas.cena.usp.br/Zagato/FAN1Atenuaçãoogama.doc](http://apostilas.cena.usp.br/Zagato/FAN1Atenuaçãoogama.doc) (consultado em julho de 2011)

### **Relatórios consultados**

Takai, V.; Scarpelli, W.; Frizzo, C.; Faria, M.A.S.; Campos, W.F. 1990. *Jazidas Auríferas de Pitangui, Minas Gerais, Brasil*. Unigeo Geologia e Mineração Ltda. (não publicado)

CODEMIG/Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2001. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Área 2. Projeto Pitangui – São João Del Rey – Ipatinga. Volume I, Texto técnico.