

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA - CEPSRM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM  
DEPÓSITOS MINERAIS: UMA APLICAÇÃO NAS  
MINAS DO CAMAQUÃ/RS, BRASIL**

**RAQUEL BARROS BINOTTO**

Porto Alegre – RS

2015

**Raquel Barros Binotto**

**IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM DEPÓSITOS MINERAIS: UMA  
APLICAÇÃO NAS MINAS DO CAMAQUÃ/RS, BRASIL**

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha

**Banca Examinadora:** Dr. Jorge Henrique Laux

Dra. Rosemary Hoff

Dr. Wilson Wildner

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – UFRGS, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Sensoriamento Remoto, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, Linha de Pesquisa Sensoriamento Remoto Aplicado.

Porto Alegre – RS

2015

Binotto, Raquel Barros

IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES ESPECTRAIS EM DEPÓSITOS  
MINERAIS: UMA APLICAÇÃO NAS MINAS DO CAMAQUÃ/RS,  
BRASIL / Raquel Barros Binotto. -- 2015.

118 f .

Orientadora: Dejanira Luderitz Saldanha.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em  
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-  
Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-  
RS, 2015.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Espectroscopia de  
Reflectância. 3. Alteração Hidrotermal. 4. Cobre. 5.  
ASTER. I. Saldanha, Dejanira Luderitz, orient. II.  
Título.

*Aos meus pais*

*Ayres e Simone.*

*Aos meus irmãos*

*Daniela e Marcelo.*



## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela recorrente acolhida acadêmica, desde a Graduação em Geologia, propiciando o contínuo aprimoramento técnico da pesquisadora, e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pela estrutura disponibilizada.

À minha orientadora, Dra. Dejanira Luderitz Saldanha, pelo apoio em momento decisivo e incentivo constante.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), por viabilizar a realização desta pesquisa. Referência especial aos colegas geólogos José Leonardo Silva Andriotti e Ana Claudia Viero que, na condição de superiores hierárquicos, sempre apoiaram todas as etapas de desenvolvimento desta pesquisa. De fato, “os melhores chefes” que eu poderia ter nesta fase da minha vida. Além deles, agradecimento especial à colega bibliotecária Ana Lucia Borges Fortes Coelho, incansável no atendimento de minhas demandas. À colega Monica Mazzini Perrotta, pela dedicação, paciência e disponibilidade, sem dúvida, minha “guru” do Sensoriamento Remoto na CPRM. Agradeço, também, a todos os meus colegas que de alguma forma contribuíram, seja técnica ou emocionalmente, para a consecução deste estudo. À Alessandra, Ana Cristina, Ana Paula, Andréia, Carlos, Daiane, Débora, Guilherme, Iglesias, Ilse, Jorge, José Luiz, Karine, Marcos Alexandre, Maristela, Michel, Oscar, Roberto, Rodrigo, Suzana, Toniolo, Wilson, muito obrigado.

À Votorantim Metais, pela liberação dos dados da Mina Uruguai e apoio no desenvolvimento da pesquisa. Aos geólogos Samuel e Rodrigo, pelo apoio técnico e disponibilidade recorrente. À geóloga Aline pela amizade, dedicação, empenho e comprometimento com os estudos desenvolvidos.

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Em especial, à Magdalena, incansável na Secretaria do Pós; às docentes Rita e Elba, que me apoiaram, juntamente com a Dejanira, em momento crítico do doutorado; aos colegas e amigos Maria Lujan e Paulo, pelas discussões técnicas e apoio incondicional no desenvolvimento da Tese, e à Dayana e Ismael, pelo apoio constante.

À minha família e amigos, em especial à Juliana, Isadora, Firmino, Ana Lúcia, Gracianine, Daniela, Fabiana, Ana Cristina, pela compreensão e incentivo para a realização do Doutorado.

## RESUMO

No presente estudo foram empregadas diferentes técnicas de sensoriamento remoto com vistas a sua utilização na exploração e estudo de depósitos minerais, com foco na redução de tempo e custos em programas de geologia e exploração mineral. A área de estudo está situada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, na localidade de Minas do Camaquã, a aproximadamente 350 km da capital do estado, Porto Alegre, com acesso final através da BR- e estradas vicinais. As coordenadas de referência da Mina Uruguai são 30°54'34" Sul e 53°26'37" Oeste. Dados multiespectrais do sensor ASTER pré-processados (calibração radiométrica e correção atmosférica), na faixa do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (350 a 2500 nm), em conjunto com análises espectrais de amostras de rochas sedimentares eopaleozoicas foram utilizados com vistas ao mapeamento espectral da alteração hidrotermal associada às ocorrências de cobre na Mina Uruguai (Minas do Camaquã/RS). As leituras foram efetuadas em um espectrorradiômetro portátil *ASD FieldSpec-3 High-Resolution* e a interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi efetuada com o apoio do software *The Spectral Geologist* (TSG™Pro). O algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) foi selecionado para o mapeamento espectral da cena do sensor ASTER. Foram identificados caulinita + ilita (fengita + muscovita) + clorita (férica e ferromagnésiana) + hematita + goetita, paragênese mineral que, associada a outras características observadas na Mina Uruguai, é consistente com alteração hidrotermal sob condições epitermais de baixo enxofre. Como resultado do mapeamento espectral, foram reconhecidas zonas argilizadas (ilita) e sericitizadas. O tipo de alteração, com ocorrência restrita a apenas alguns metros a partir dos filões, diferentemente do que ocorre, por exemplo, nos depósitos de cobre pórfiro, onde a alteração hidrotermal é intensa e pervasiva, torna mais complexa sua identificação na cena ASTER. A cobertura vegetal identificada na região também é elemento interferente na aplicação da técnica, a qual deve ser utilizada de forma combinada à espectroscopia de reflectância, para resultados mais efetivos em áreas com condições fisiográficas pouco favoráveis (clima úmido, com cobertura vegetal e alteração intempérica).

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, espectroscopia de reflectância, alteração hidrotermal, cobre, ASTER

## ABSTRACT

The present study applied different remote sensing techniques to evaluate its use in the exploration and study of mineral resources, focusing on the reduction of time and costs of geology and mineral exploration programs. The study area is located in the south central portion of the state of Rio Grande do Sul, in the municipality of Caçapava do Sul, in Minas do Camaquã, about 350 km from the state capital, Porto Alegre, with last access through BR - 153 and country roads. The reference coordinates of Mina Uruguay are 30°54'34" South and 53°26'37" West. ASTER multispectral data preprocessed (radiometric calibration and atmospheric correction) in the visible, near infrared and shortwave infrared (350 to 2500 nm), in conjunction with eopaleozoicas sedimentary rock samples spectral analyzes, were used to spectral mapping of hydrothermal alteration associated with copper occurrences in Mina Uruguay (Minas Camaquã / RS). Spectral analysis were performed on ASD FieldSpec-3 High-Resolution portable spectroradiometer and the spectral signatures mineralogical interpretation was done in The Spectral Geologist (TSG™ Pro) software. The algorithm Spectral Angle Mapper (SAM) was selected for the spectral mapping of ASTER scene. It was identified mineral paragenesis consists of kaolinite + illite (phengite + muscovite) + chlorite (ferric and ferromagnesian) + hematite + goethite, which, combined with other characteristics observed in Mina Uruguay, is consistent with low sulphidation epithermal hydrothermal alteration. As a result of spectral mapping, it was also identified areas with illite and sericite. The kind of alteration, with occurrence restricted to just a few meters from the veins, unlike what happens, for example, deposits of porphyry copper, where the hydrothermal alteration is intense and pervasive, becomes more complex your recognition in ASTER scene. The vegetation identified in the region is also intervening material on technical application, which must be used in combination with reflectance spectroscopy for more effective results in areas with unfavorable physiographic conditions (humid climate with vegetation and weathering).

**Keywords:** remote sensing, reflectance spectroscopy, hydrothermal alteration, copper, ASTER

## SUMÁRIO

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.   | INTRODUÇÃO.....   | 8   |
| 2.   | OBJETIVOS.....  | 11  |
| 3.   | ÁREA DE ESTUDO.....   | 12  |
| 3.1. | Localização.....  | 12  |
| 3.2. | Contexto geológico.....   | 13  |
| 3.3. | Mineralização.....  | 17  |
| 4.   | ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E DE IMAGEAMENTO (SENSOR ASTER) APLICADA À EXPLORAÇÃO MINERAL.....   | 20  |
| 5.   | MATERIAL E MÉTODOS.....   | 27  |
| 5.1. | Revisão Bibliográfica e Sistematização de Dados Existentes.....   | 27  |
| 5.2. | Estruturação do Banco de Dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG).....   | 27  |
| 5.3. | Trabalhos de Campo e Coleta de Amostras.....  | 27  |
| 5.4. | Aquisição e Análise de Dados Espectrais.....  | 28  |
| 5.5. | Seleção e Processamento Digital de Cena ASTER.....  | 28  |
| 5.6. | Integração e Análise dos Dados.....   | 29  |
| 6.   | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 30  |
| 6.1. | Artigo Científico 1: Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimentais..... | 30  |
| 6.2. | Artigo Científico 2: Aplicação da técnica de mapeamento espectral na Mina Uruguai, Caçapava do Sul/RS, a partir de imagens multiespectrais ASTER.....                             | 52  |
| 7.   | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 69  |
| 8.   | REFERÊNCIAS.....  | 71  |
|      | ANEXOS.....   | 86  |
|      | Anexo A: Amostras de Rocha – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância.....  | 89  |
|      | Anexo B: Amostras de Testemunhos – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância.....  | 105 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1: Localização da área de estudo.....   | 12 |
| Figura 3.2: Croqui geológico das Minas do Camaquã (RIBEIRO, 1978 retirado de LAUX, 1999).....  | 15 |
| Figura 3.3: Seção geológica esquemática leste (Minas do Camaquã) - oeste (Lavras do Sul) mostrando os principais depósitos minerais da região (retirado de LAGO, 2013). .....  | 16 |
| Figura 3.4: Modelo esquemático conceitual (SILLITOE, 1995) mostrando os principais tipos de depósitos já propostos para as Minas do Camaquã a partir de um corpo intrusivo (retirado de LAUX, 1999). .....                     | 19 |
| Figura 4.1: Espectro eletromagnético.....  | 21 |
| Figura 4.2: (a) Principais fontes de energia disponíveis para o sensoriamento remoto terrestre; (b) Transmissão da radiação através da atmosfera, mostrando as bandas de absorção e as janelas atmosféricas (GUPTA, 2003)..... | 22 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1: Algumas propostas de nomenclatura estratigráfica para a área de estudo (compilado de PAIM <i>et al.</i> , 2000; FAMBRINI, 2003; BORBA, 2006). ..... | 14 |
| Tabela 3.2: Principais características dos tipos de depósito propostos para a área de estudo (retirado de Laux, 1999). .....                                    | 18 |
| Tabela 4.2: Características principais do sensor ASTER ( <a href="http://asterweb.jpl.nasa.gov">http://asterweb.jpl.nasa.gov</a> ). .....                       | 25 |

## 1. INTRODUÇÃO

As ocorrências cupríferas, em associação com ouro e prata, das Minas do Camaquã, localizadas no município de Caçapava do Sul, foram descobertas em 1865 por mineiros ingleses que garimpavam ouro na região (TEIXEIRA; GONZALEZ, 1988) e estiveram ativas por praticamente um século, tendo sido objeto de intensas pesquisas e explorações minerais (GORCEIX, 1875; CARVALHO, 1932; LEINZ, 1939; LEINZ; ALMEIDA, 1941; RIBEIRO *et al.*, 1966; RIBEIRO, 1970; BETTENCOURT, 1972; TEIXEIRA *et al.*, 1978a, b; RIBEIRO *et al.*, 1980; VEIGEL, 1989; VEIGEL; DARDENNE, 1990; RIBEIRO, 1991; LIMA *et al.*, 1997; LAUX; LINDENMAYER, 1998, 2000a, b; LAUX, 1999; REMUS *et al.*, 1999, 2000; RONCHI *et al.*, 2000; LAUX *et al.*, 2005; TROIAN, 2009).

Os modelos genéticos sobre as mineralizações foram sendo modificados a partir da aquisição de novos dados e aplicação de novas tecnologias, até o modelo atualmente mais aceito, do tipo hidrotermal – epitermal de baixo enxofre (LIMA *et al.*, 1997; LAUX; LINDENMAYER, 1998, 2000a, b; LAUX, 1999; REMUS *et al.*, 1997, 1999, 2000; LAUX *et al.*, 2005).

Depósitos epitermais são epigenéticos, formados em níveis rasos dentro da crosta, entre 1 ou 2 km, em temperaturas compreendidas entre <150 e ≈300°C. São produto de grandes sistemas hidrotermais convectivos, movimentados por calor magmático nos primeiros quilômetros da crosta, relacionados principalmente com rochas vulcânicas (LINDGREN, 1913, 1922; SILLITOE, 1999; HEDENQUIST *et al.*, 1996).

Conforme Sillitoe e Hedenquist (2003), dois tipos principais de depósitos epitermais – baixo e alto enxofre – vinham sendo reconhecidos e referidos em diferentes trabalhos nos anos 70/80/90 (SILLITOE, 1977, 1989, 1993; BUCHANAN, 1981; ASHLEY, 1982; GILES; NELSON, 1982; HAYBA *et al.*, 1985; BONHAM, 1986; HEALD; FOLEY; HAYBA, 1987; HEDENQUIST, 1987; BERGER; HENLEY, 1989; ALBINO; MARGOLIS, 1991). No final dos anos 90 e início de 2000, três tipos passaram a ser identificados nos depósitos epitermais: alto (*HS – high-sulphidation*), intermediário (*IS – intermediate-sulphidation*) e baixo (*LS – low-sulphidation*) enxofre (JOHN; GARSIDE; WALLACE, 1999; HEDENQUIST; ARRIBAS; GONZALEZ-URIEN, 2000; JOHN, 2001). Os do tipo alto enxofre contêm assembleias minerais ricas em enxofre, tipicamente pirita-enargita-luzonita-famantita-covelita, com encaixantes ricas em sílica e halo de alteração argílica. Em contraste, os

depósitos de baixo enxofre contêm tipicamente o par de sulfetos pirita-arsenopirita, este último presente em quantidades menores em veios de quartzo, calcedônia e adularia com calcita subordinada. Quantidades menores de Cu (tipicamente inferiores a 100-200 ppm) estão presentes como calcopirita. Pirrotita também está presente em quantidades traço. Os depósitos do tipo intermediário possuem estado de sulfetação intermediário entre os outros dois, tipicamente com calcopirita, tetraedrita-tennantita e esfarelita pobre em FeS (SILLITOE E HEDENQUIST, 2003).

Neste contexto, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto em depósitos minerais, incluindo os epitermais, é embasada nas diferenças nas propriedades de reflectância das rochas alteradas hidrotermalmente, em relação às rochas hospedeiras. Este fato diagnóstico tem sido aproveitado pelos pesquisadores na área de sensoriamento remoto na localização e mapeamento de áreas potenciais para mineralizações, através de interpretações de imagens de satélite multi e hiperespectrais, aliadas a utilização de espectrorradiômetros portáteis para aplicações em campo e/ou laboratório (HUNT, 1979; HERRMANN *et al.*, 2001; YANG *et al.*, 2001; SUN; SECCOMBE; YANG, 2001; CARRANZA; HALL, 2002; TANGESTANI; MOORE, 2002; KRUSE; BORDMAN; HUNTINGTON, 2003; DUCART, 2004; JONES; HERMANN; GEMMELL, 2005; YANG *et al.*, 2005; MARS; ROWAN, 2006, 2010; DI TOMMASO; RUBINSTEIN, 2007; YUJUN; JIANMIN; FOJUN, 2007; ZHANG; PANZER; DUKE, 2007; MOORE *et al.*, 2008; TANGESTANI *et al.*, 2008; BEDINI; VAN DER MEER; VAN RUITENBEEK, 2009; HERRMANN *et al.*, 2009; DOUBLIER; ROACHE; POTEL, 2010; GABR; GHULAM; KUSTY, 2010; LAUKAMP *et al.*, 2011; POUR; HASHIM, 2011; POUR; HASHIM; MARGHANY, 2011).

De fato, entre as vantagens da utilização de técnicas de sensoriamento remoto em programas de exploração mineral, há que se ressaltar que tais dados são georreferenciados e espacialmente compreensíveis, fornecendo uma boa base cartográfica; de processamento rápido, apesar de trabalhoso; de baixo custo ou gratuitos, onerando pouco o custo total dos projetos. Logo, o processamento e interpretação adequados destes dados permitem a otimização da distribuição dos recursos destinados às investigações geológicas e de recursos minerais. Estimativas de custo, empregando diferentes técnicas em campanhas de exploração mineral efetuadas pela empresa de mineração norte-americana Noranda, mostram um custo de produção mensal variando de 80-1500 US\$ gastos com geoquímica (para cobrir uma área de 100-500 km<sup>2</sup>) e de 50-500 US\$ com geofísica (1500-3000 km<sup>2</sup>), para ~4 US\$ utilizando



imagens de satélites em uma área ~60000 km<sup>2</sup> ou 20-100 US\$ com levantamento aéreo hiperespectral (5000 a 40000 km<sup>2</sup>).

De forma convencional, a caracterização de minerais hidrotermais se dá por meio de técnicas analíticas como difratometria de raios-X e microscopia ótica e eletrônica. No entanto, espectrorradiômetros portáteis representam uma ferramenta eficaz na identificação rápida de minerais e de suas variações em termos da composição química, podendo ser aplicada na identificação das diferenças mineralógicas presentes em sistemas hidrotermais.

É nesta perspectiva que está inserido o presente estudo, aliando-se diferentes técnicas de sensoriamento remoto para utilização em programas de exploração mineral, com foco na redução de tempo/custos das pesquisas ora em desenvolvimento no setor mineral, como na região estudada.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a utilização de diferentes técnicas de Sensoriamento Remoto para demonstrar sua aplicação como ferramenta na exploração e estudo de depósitos minerais.

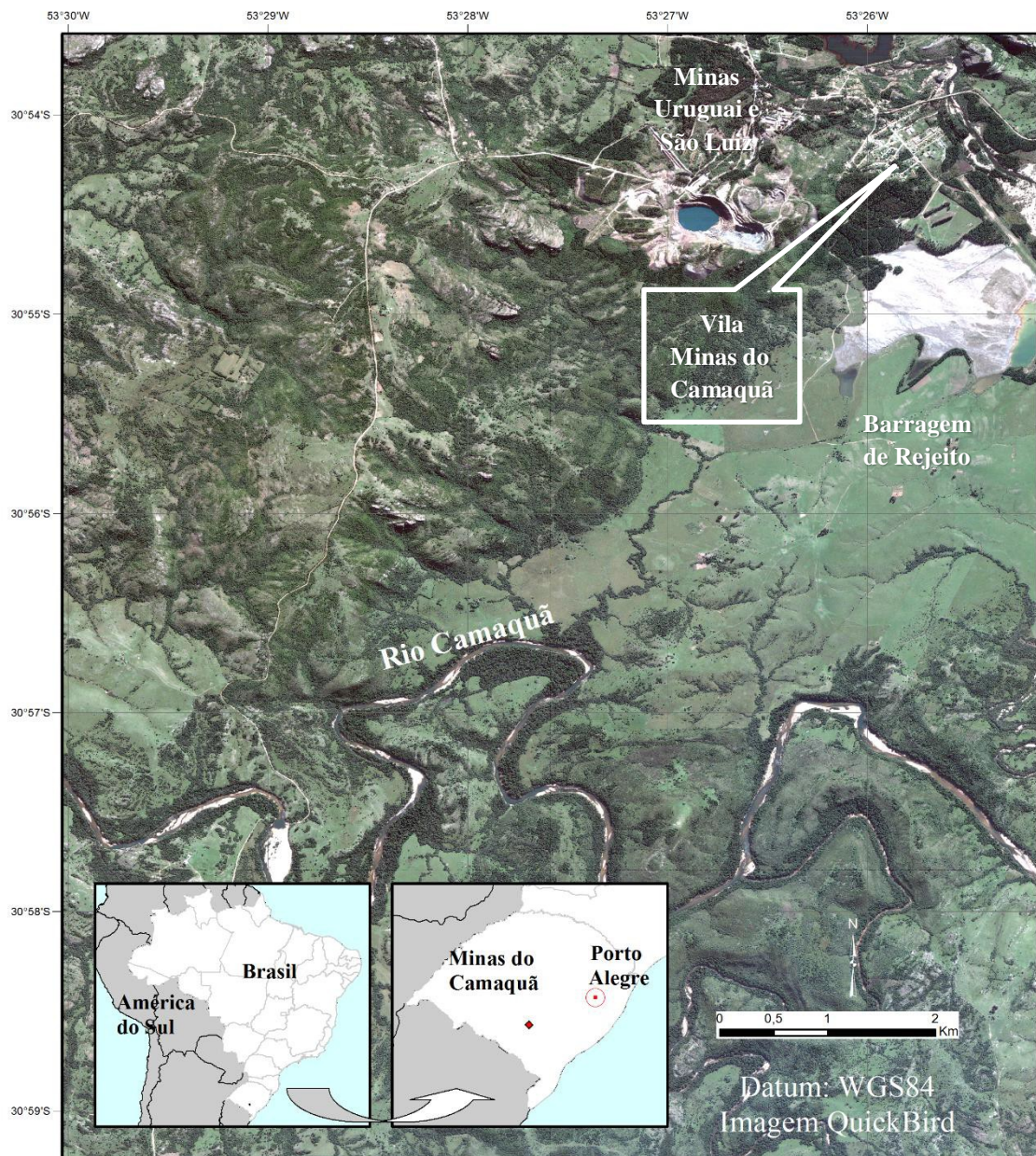
Como objetivos específicos, destacam-se:

- ✓ estudar o potencial das técnicas não invasivas de análise mineralógica de rochas, como uma abordagem inicial de investigação;
- ✓ identificar, a partir de espectros de reflectância, os minerais de alteração hidrotermal já caracterizados na Mina Uruguai;
- ✓ avaliar a aplicação de técnicas de processamento digital em cenas ASTER no mapeamento de áreas de alteração hidrotermal.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização

A Mina Uruguai, objeto do presente estudo, com coordenadas de referência 30°54'34" Sul e 53°26'37" Oeste (Figura 3.1), está situada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, na localidade de Minas do Camaquã, a aproximadamente 350 km da capital do estado, Porto Alegre, com acesso final através da BR-153 e estradas vicinais.



**Figura 3.1: Localização da área de estudo.**

### 3.2. Contexto geológico

As Minas do Camaquã estão inseridas na Bacia do Camaquã, entidade geotectônica complexa, constituída por rochas sedimentares siliciclásticas e vulcanogênicas, geradas no Neoproterozóico III – Eopaleozóico, que vem sendo estudada e discutida por diferentes grupos de pesquisadores ao longo dos anos, tendo sido propostos modelos tectônicos e colunas estratigráficas diversos, permanecendo um tema controverso até a atualidade. Na Tabela 3.1 são apresentadas, de forma resumida, algumas propostas estratigráficas já efetuadas para a região. Tendo em vista que os mapas geológicos de detalhe existentes na área de estudo, bem como os estudos de cunho geológico efetuados pela CBC, na época de operação da Mina Uruguai, utilizam a nomenclatura estratigráfica de Ribeiro *et al.* (1966), esta será adotada no presente estudo, que não objetiva discutir ou revisar a estratigrafia proposta ou os modelos geotectônicos estabelecidos.

Neste contexto, a região das Minas do Camaquã insere-se no Grupo Bom Jardim de Ribeiro *et al.* (1966), de idade eopaleozoica, cujas rochas sedimentares são relacionadas à Formação Arroio dos Nobres, membros Mangueirão e Vargas, sendo as rochas deste último hospedeiras das mineralizações de Cu-Pb-Zn.

Litologicamente, Ribeiro (1978) dividiu informalmente o Membro Vargas da Formação Arroio dos Nobres de Ribeiro *et al.* (1966), na região das Minas do Camaquã, em cinco níveis (Figura 3.2): Arenito Inferior, Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário, Conglomerado Superior e Arenito Superior. Com exceção do Arenito Superior, as demais unidades apresentam mineralizações.

A relação litológica com os principais tipos de depósitos minerais na região, incluindo as Minas do Camaquã, pode ser visualizada na Figura 3.3.

**Tabela 3.1: Algumas propostas de nomenclatura estratigráfica para a área de estudo (compilado de PAIM *et al.*, 2000; FAMBRINI, 2003; BORBA, 2006).**

| Carvalho (1932)                          | Leinz et al. (1941)  |                    | Robertson (1966) |                      |                      | Ribeiro et al. (1966) |                       |                           | Leites et al. (1990)       | Paim et al. (2000)      | Fragoso Cesar et al. (2003)  |
|--|----------------------|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|
|  | Efusivas Andesíticas |                    |                  |                      |                      |                       |                       |                           |                            |                         | Suíte Intrusiva Rodeio Velho |
| Série Camaquan                           | Série Camaquã        | Camaquã Horizontal | Grupo Camaquã    | Conglomerado Coxilha |                      | Grupo Camaquã         | Conglomerado Coxilha  |                           | Seq. Vulcano-sedimentar IV | Alogrupo Guaritas       | Grupo Guaritas               |
|  |                      | Camaquã Inclinado  |                  | Fm. Guaritas         |                      |                       | Fm. Guaritas          |                           |                            |                         |                              |
|  |                      |                    |                  | Fm. Santa Bárbara    | Mb. Andesito Martins |                       | Fm. Santa Bárbara     | Mb. Rodeio Velho          |                            |                         |                              |
| Erupções de Andesitos e Tufos Vulcânicos | Efusivas Ácidas      |                    | Riolito Ramada   |                      |                      | Grupo Bom Jardim      | Fm. Crespos           | Acampamento Velho         | Seq. Vulcanogênica III     | Alogrupo Cerro do Bugio | Formação Acampamento Velho   |
|  |                      |                    |                  |                      |                      |                       | Fm. Arroio dos Nobres | Mb. Hilário               |                            |                         |                              |
| Fm. Maricá                               |                      | Fm. Maricá         |                  |                      | Fm. Maricá           |                       |                       | Seq. Vulcano-sedimentar I | Alogrupo Maricá            | Grupo Maricá            |                              |

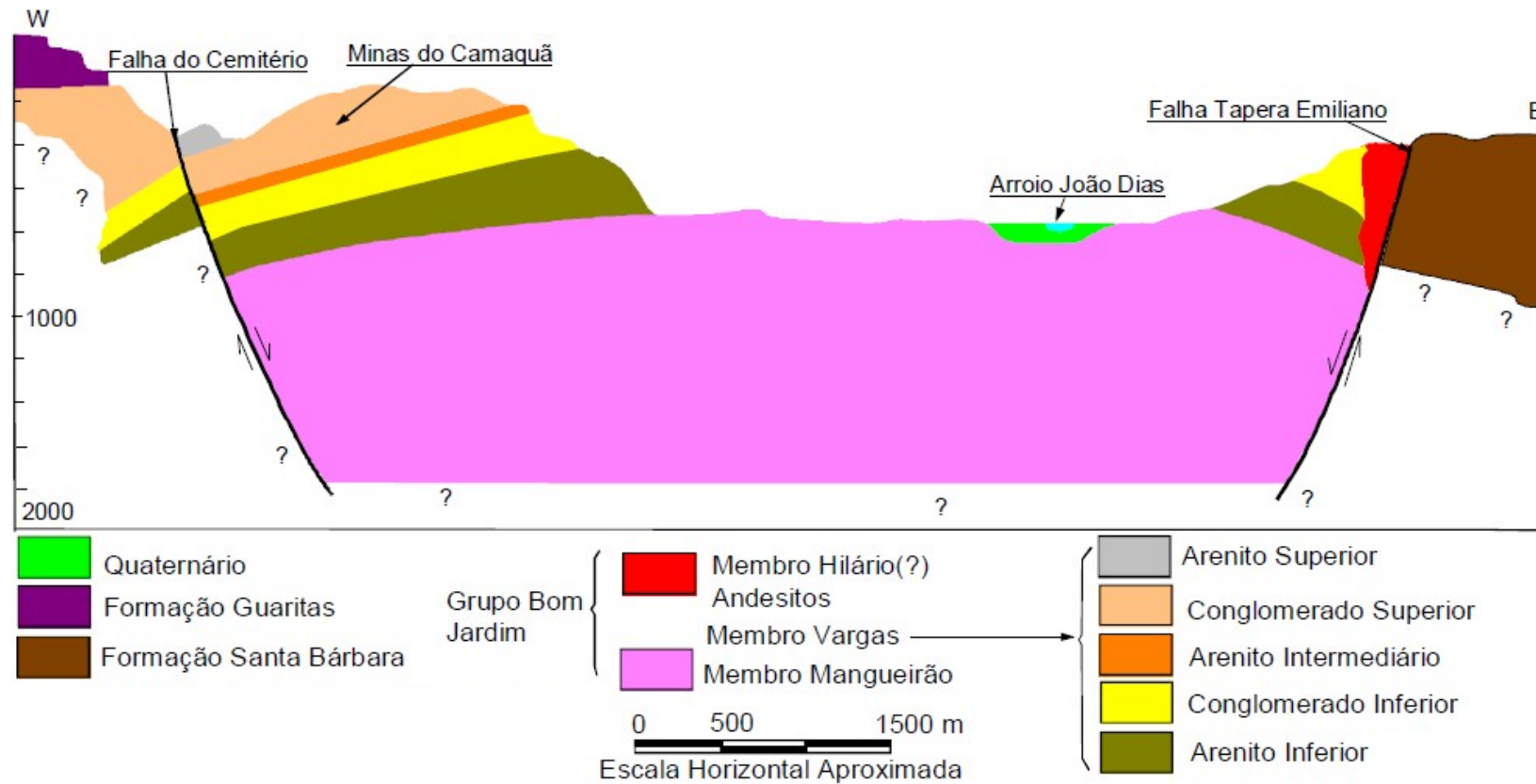
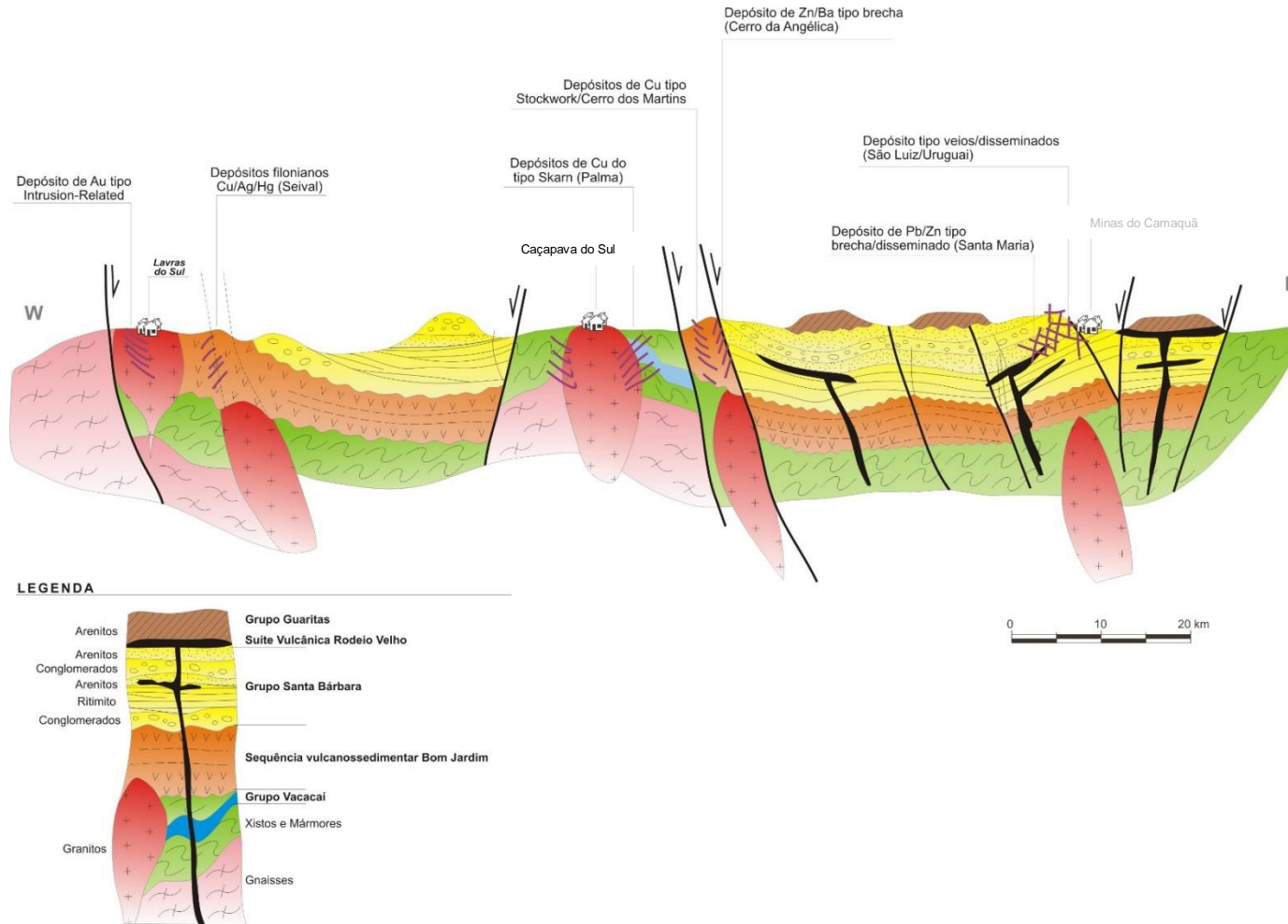


Figura 3.2: Croqui geológico das Minas do Camaquã (RIBEIRO, 1978 retirado de LAUX, 1999).





**Figura 3.3: Seção geológica esquemática leste (Minas do Camaquã) - oeste (Lavras do Sul) mostrando os principais depósitos minerais da região (retirado de LAGO, 2013).**

### 3.3. Mineralização

Conforme descrito nos trabalhos de Teixeira *et al.* (1978a,b), Laux (1999) e Troian (2009), entre outros, o minério das Minas do Camaquã ocorre sob duas formas, em filões e disseminações. Os filões preenchem falhas, apresentando os sulfetos sob forma maciça ou em massas irregulares no interior de ganga de quartzo, hematita, clorita, calcita e barita. A margem dos veios está marcada por intensa alteração hidrotermal representada por silicificação, cloritização, caulinização e sulfetação, ocorrendo quartzo, pirita, calcopirita, bornita, hematita e ouro. Calcita e barita representam a mineralogia tardia, ocorrendo disseminadas e como veios com até 15 cm de espessura nos arenitos e conglomerados. O minério disseminado ocorre nos conglomerados e arenitos, sendo interpretado por diversos autores como parte das zonas de alteração hidrotermal que se desenvolveram no entorno dos veios, representando a manifestação lateral do controle estrutural da mineralização, com os sulfetos ocupando a porosidade secundária da rocha encaixante. Próximo da superfície há uma zona de oxidação, onde o minério contém pequenas quantidades de ouro e prata. A paragênese é simples, constituída principalmente por sulfetos de cobre: calcopirita, bornita e calcosita, além de pirita.

No que se refere ao modelo genético das mineralizações, a Tabela 3.2, retirada de Laux (1999), sintetiza as diversas proposições efetuadas ao longo dos anos nas Minas do Camaquã, e a Figura 3.4, ilustra um modelo idealizado por Siltoe (1995) que contempla as hipóteses genéticas levantadas para as Minas do Camaquã. Atualmente, o modelo genético epitermal de baixo enxofre é o mais aceito para a Mina Uruguai.

Os depósitos epitermais se formam no intervalo de temperaturas de  $<150^{\circ}\text{C}$  a  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ , em condições crustais que vão da superfície até uma profundidade de 1 a 2 km, tendo como características diagnósticas altos conteúdos de Au e Ag, baixa salinidade (frequentemente  $<5\%$  equiv. peso de NaCl), evidência de boiling (ebulição) e de água meteórica como a maior fonte dos fluidos mineralizantes (WHITE; HEDENQUIST, 1995). Além da paragênese, onde o tipo mais comum é adularia-sericita  $\pm$  illita, os depósitos epitermais de baixo enxofre apresentam uma estrutura de veios melhor definida, menor afinidade magmática, por serem gerados a partir de fluidos com menores temperaturas ( $100\text{-}250^{\circ}\text{C}$ ), salinidades atenuadas (0-3% de NaCl), pH neutro, e ambiente de deposição redutor (MARCOUX, 1995).



**Tabela 3.2: Principais características dos tipos de depósito propostos para a área de estudo (retirado de Laux, 1999).**

| Características                | Tipos de Depósito   |   |  |   |
|--------------------------------|---|---|--|---|
|                                | Depósito de Cobre Porfirítico   | Depósitos Sedimentares – Tipo <i>Red Beds</i>                             | Depósitos Epitermais   | Minas do Camaquã  |
| Ambiente Tectônico             | Arco magmático, margens continentais, arcos de ilha (1, 2, 3)   | Bacias continentais fechadas do tipo <i>rift</i> (7, 8)                   | Arco magmático (10)  | Arco magmático (13)   |
| Idade                          | Fanerozóico – Mesozóico até Cenozóico. Alguns Paleozóicos e Pré-Cambrianos (1, 4)   | Ampla variação de tempo, principais no Proterozóico (9)                   | Variável, principais Paleozóicos e Cenozóicos (10)   | Eo-Paleozóico (14, 15)  |
| Magmatismo Associado           | Shoshonítico, cálcio-alcálico (1, 2, 3)   | -   | Cálcio-alcálico, principal (10)  | Shosh. ou cálcioalcálico (13, 27)   |
| Reservas                       | 1 a 3 bilhões de t com 0,8 a 2% de Cu (1, 2)  | Variável, até 321 x 106 t com 0,8 a 4,84% de Cu (9)                       | Variáveis (10, 11, 12)   | 31 x 106 t com 1,06% de Cu (16)   |
| Controle                       | Estrutural (1, 2)   | Litológico, secundariamente estrutural (9)                                | Estrutural (10, 11, 12)  | Estrutural, litológico subordinado (16, 17)   |
| Rochas Encaixantes             | Metasedimentares e Metavulc. (4)  | Principalmente folhelhos e arenitos (7, 8, 9)                             | Variáveis. (10, 11, 12)  | Arenitos e conglomerados (16, 17, 18)   |
| Ambiente Depositional          | -   | Leques Aluviais e arenitos eólicos (7, 8)                                 | -  | Leques aluviais. (18, 19)   |
| Alteração/Metamorfismo         | Alteração potássica, propilítica, fílica e argílica (1, 2, 4)   | -   | Alteração potássica, propilítica (10)  | Alteração propilítica, sericítica e hematítica (20)   |
| Composição dos Fluidos         | Inicialmente magmáticos $\delta^{34}S$ próximos a zero, com alta salinidade-até 40% equiv. peso NaCl. Final mistura-magmático/meteorico com salinidade <20 equiv. peso NaCl (1, 2, 5) | $\delta^{34}S$ usualmente >30‰, pode ser bastante variável (7, 8, 9)      | Inicialmente magmáticos $\delta^{34}S$ próximos a zero, final mistura – magmático/meteorico com salinidade <10 equiv. peso NaCl (10, 11, 12) | Iniciais com $\delta^{34}S \approx$ zero (magmáticos). Finais meteoricos $\delta^{34}S$ próximos a 14‰; salinidade <14% equiv. peso NaCl (21, 22, 23, 24, 25) |
| Temperatura Formação/Alteração | Inicial $\approx 800^\circ C$ e finais próximas a $250^\circ C$ (1, 2, 4)   | Menores que $100^\circ C$ (9)   | Entre 150 e $300^\circ C$ (5, 11)  | $\approx 300^\circ C$ (geotermometria da clorita). Finais $\approx 80^\circ C$ (inclusões fluidas) (24, 25, 26)   |
| Metais Associados              | Cu (Mo,Pb,Zn, Au-Ag) (1, 6)   | Cu (Pb, Zn, Co, Au, Ag) (9)   | Cu (Au, Ag, Hg) (10, 12)   | Cu (Au, Ag) (16, 17, 24)  |
| Zoneamento                     | Zonas centrais com pirita e calcopirita (cp), externas com cp e molibdenita e apicais com cp, galena, esfalerita, ouro e prata(6)   | Lateral e vertical, com calcosita, bornita, calcopirita, pirita (7, 8, 9) | Não evidenciada (10, 11, 12)   | A partir das fraturas, com pirita, calcopirita, bornita, calcosita  |

(1)Beane; Titley (1981), (2)Titley; Beane (1981), (3)Sawkins (1990), (4)McMillan; Panteleyev (1988), (5)Roedder (1984), (6)Lowel; Gilbert (1970), (7)Haynes (1986), (8)Brown (1993), (9)Gustafson; Willians (1981), (10)Berger; Henley (1988), (11)Bodnar *et al.* 1985, (12)Oyarzun (1991), (13)Nardi; Bonin (1991), (14)Soliani Júnior (1986), (15)Sartori; Kawashita (1985), (16)Teixeira; Gonzalez (1988), (17)Bettencourt (1972), (18)Veigel (1989), (19)Faccini *et al.* (1987), (20)Leinz; Almeida (1941), (21)Beckel (1992), (22)Bettencourt (1976), (23)Remus *et al.* (1997), (24)Lima (1998), (25)Ronchi *et al.* (1998), (26)Laux; Lindenmayer (1998), (27)Nardi; Lima (1985).

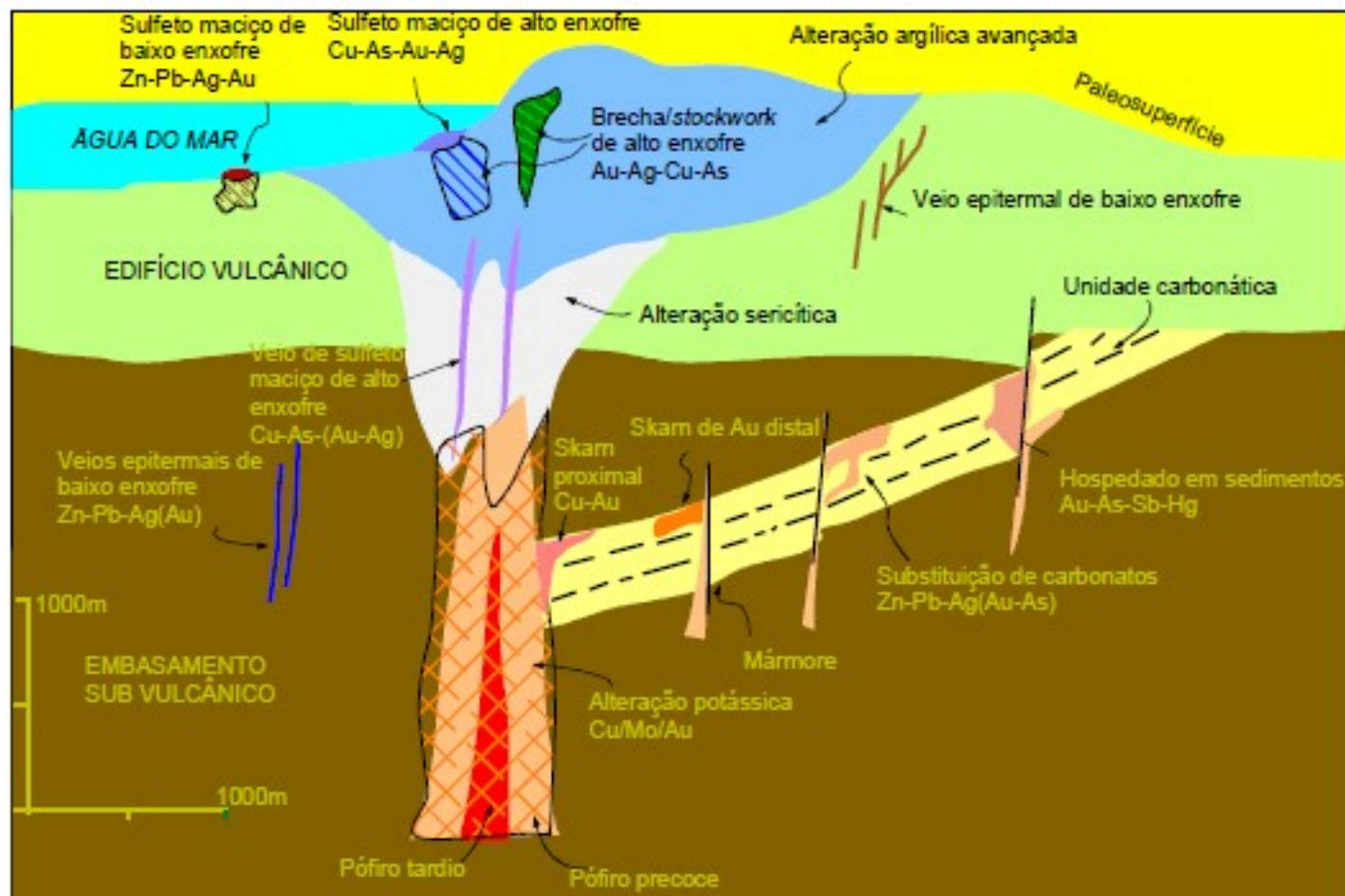


Figura 3.4: Modelo esquemático conceitual (SILLITOE, 1995) mostrando os principais tipos de depósitos já propostos para as Minas do Camaquã a partir de um corpo intrusivo (retirado de LAUX, 1999).

#### **4. ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA E DE IMAGEAMENTO (SENSOR ASTER) APLICADA À EXPLORAÇÃO MINERAL**

Os dados obtidos por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto tem se mostrado de fundamental importância na diferenciação litológica das regiões pouco conhecidas e na discriminação de produtos de alteração superficial relacionados a depósitos minerais.

Os sensores remotos detectam a energia eletromagnética proveniente de um objeto iluminado, a transformam em um sinal elétrico e o registram, de tal forma que este possa ser transmitido e convertido em informações que descrevem as características espectrais dos objetos que compõem a superfície terrestre.

Os sistemas sensores podem ser mantidos no nível orbital (satélites) ou suborbital (acoplados em aeronaves ou mantidos ao nível do solo). Ao nível do solo é realizada a aquisição de dados em campo ou em laboratório onde as medidas são obtidas utilizando-se espectrorradiômetros (MORAES, 2002).

A energia eletromagnética não precisa de um meio material para se propagar, sendo definida como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ). É emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin ou  $-273,15^\circ\text{C}$ ) e pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência, sendo esta disposição denominada de espectro eletromagnético (Figura 4.1) (MORAES, 2002).

O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre (Figura 4.2).

Esta energia, ao atravessar a atmosfera terrestre, é absorvida, refletida e/ou espalhada seletivamente, dependendo da composição da atmosfera e do comprimento de onda. Os principais gases absorvedores da radiação eletromagnética são vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). As faixas espectrais de menor absorção correspondem às janelas atmosféricas, utilizadas para registrar os fenômenos que ocorrem na superfície da Terra a partir de plataformas aéreas ou espaciais (Figura 4.2) (GUPTA, 2003).

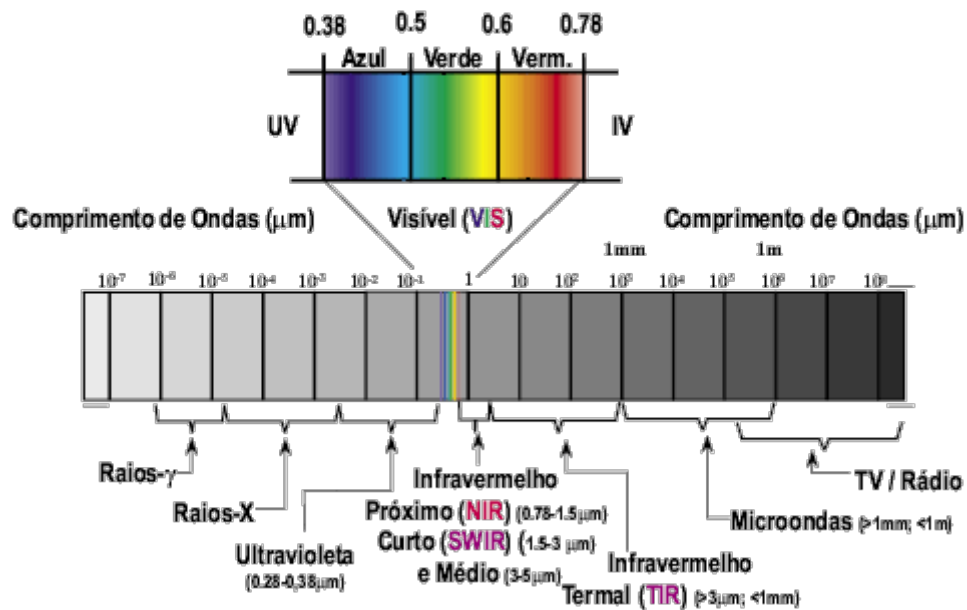
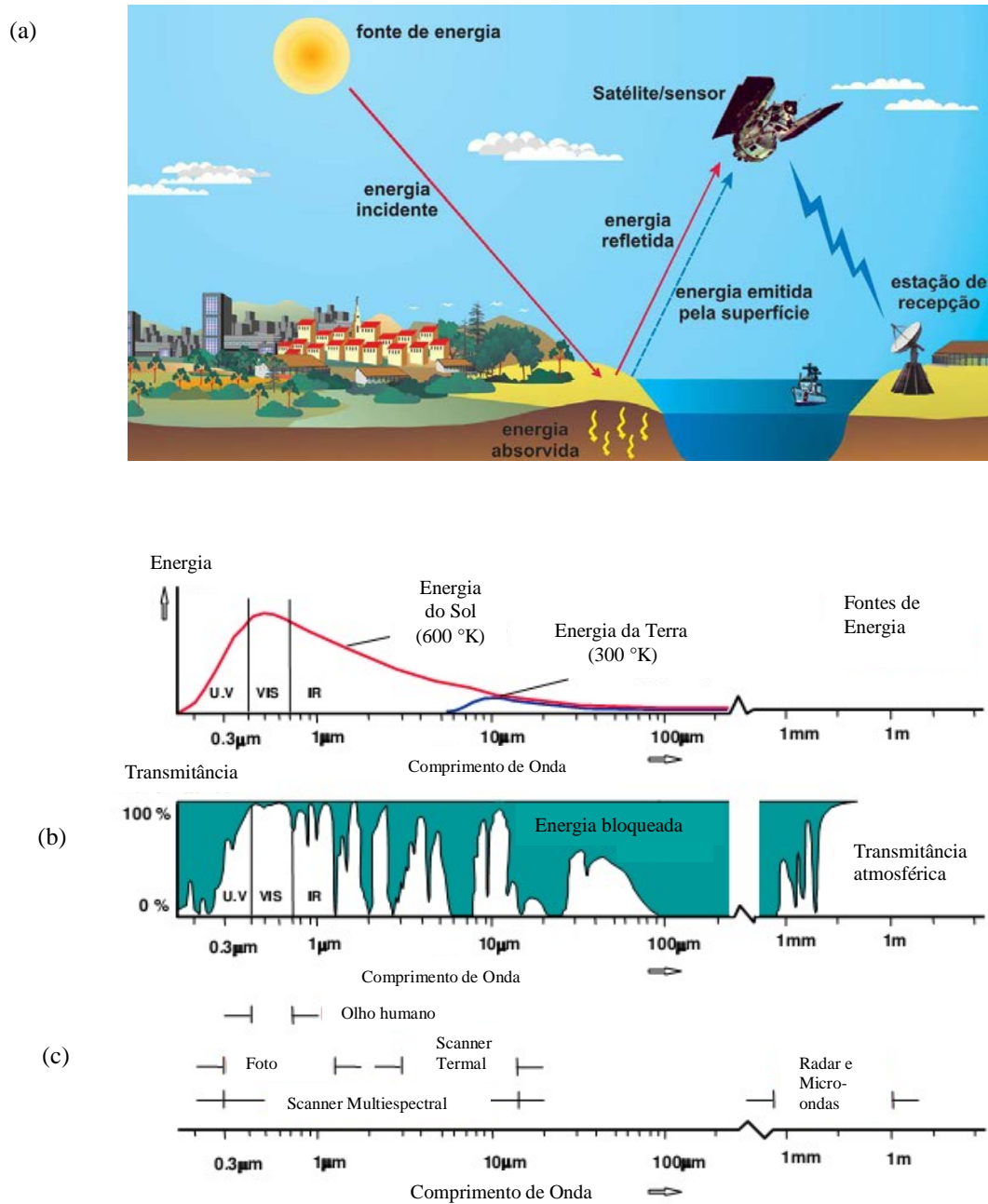


Figura 4.1: Espectro eletromagnético.

A intensidade espectral da radiação solar refletida por qualquer superfície natural depende das propriedades físicas e químicas de dado material. Vários processos moleculares e eletrônicos resultam da interação entre a energia incidente e os minerais constituintes das rochas. Na faixa espectral entre 0,4 e 2,5  $\mu\text{m}$ , as feições nos espectros de reflectância das rochas devem-se a processos eletrônicos ou vibracionais resultantes da interação entre a energia com os átomos/moléculas que formam os minerais (HUNT; SALISBURY, 1970; HUNT; SALISBURY; LENHOFF, 1973; HUNT, 1980).

A espectroscopia de reflectância é uma técnica analítica que usa a energia eletromagnética refletida pelos materiais nas regiões do visível-infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), com o objetivo de obter informação sobre a composição mineralógica e química desses materiais (CLARK, 1999). A coleção dos espectros de reflectância de diferentes materiais constitui uma biblioteca espectral a qual é utilizada, por exemplo, na validação dos dados de uma imagem e na interpretação geológica confiável da cena estudada.



**Figura 4.2: (a) Principais fontes de energia disponíveis para o sensoriamento remoto terrestre; (b) Transmissão da radiação através da atmosfera, mostrando as bandas de absorção e as janelas atmosféricas (GUPTA, 2003).**

Os depósitos epitermais de metais base são gerados pela atuação de processos hidrotermais que alteram a mineralogia e composição química das rochas hospedeiras. A alteração hidrotermal produz assembleias minerais características com feições de absorção espectrais diagnósticas na faixa de comprimentos de onda do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 e 2500 nm) (ABRAMS *et al.*, 1983; ABRAMS; BROWN, 1984; SPATZ; WILSON, 1995).

A alteração supergênica em depósitos de cobre produz uma zona oxidada com extensiva ocorrência de óxidos/hidróxidos de ferro, tais como jarosita, hematita, goetita, que tendem a apresentar baixa reflectância na faixa do visível e reflectância mais elevada na faixa do infravermelho próximo (HUNT, 1977). Nesta faixa do espectro (entre 0,35 e 1,2  $\mu\text{m}$ ), os processos eletrônicos (transições atômicas) são os responsáveis pelas feições de absorção características e são importantes principalmente para os metais de transição, tais como ferro, cobre, níquel, cromo, cobalto, manganês (HUNT, 1977; CLARK, 1999).

Os minerais contendo o íon hidroxila incluindo os grupos das argilas e sulfatos, bem como os carbonatos, apresentam feições espectrais de absorção diagnósticas devido aos processos vibracionais (transições moleculares) de absorções fundamentais dos grupos Al-O-H, Mg-O-H, Si-O-H e CO<sub>3</sub> na faixa do infravermelho de ondas curtas (HUNT, 1977; HUNT; ASHLEY, 1979; CLARK *et al.*, 1990). Assim, espectros na região do SWIR podem ser utilizados para a identificação das assembleias minerais em zonas de alteração hidrotermal incluindo minerais formados pela passagem de fluidos com baixo pH (alunita e pirofilita); minerais contendo os íons Al-Si-(OH) e Mg-Si-(OH) como caulinita, micas brancas e clorita; minerais a Ca-Al-Si-(OH) como os grupos do epidoto e carbonato (calcita e dolomita) (HUNTINGTON, 1996).

De acordo com Goetz (2009), os esforços para a interpretação de imagens multiespectrais (MSS) do sensor Landsat-1 resultaram no desenvolvimento do primeiro espectrorradiômetro portátil de campo (PFRS) que operava na faixa espectral de 0,4-2,5  $\mu\text{m}$  e, como consequência, na inclusão da banda 7 ao Landsat TM. Com a crescente demanda da comunidade científica por instrumentos portáteis, empresas americanas como a Geophysical Environmental Research (GER) e a Analytical Spectral Devices (ASD) produziram espectrorradiômetros de campo tecnicamente mais avançados e fáceis de carregar.

Os espectrorradiômetros de reflectância operam no intervalo do espectro eletromagnético do VNIR e SWIR e são instrumentos que realizam medidas do Fator de Reflectância (FR), definido como a razão entre o fluxo refletido pela superfície do alvo/amostra e o fluxo refletido, na mesma geometria, por uma superfície padrão lambertiana (placa de referência com composto Spectralon), irradiada/iluminada da mesma maneira que a superfície do alvo/amostra (MOREIRA, 2003):

$$\text{FR (\%)} = (\text{leitura no alvo} / \text{leitura na placa de referência}) \times 100$$

Geralmente são equipados com uma fonte de luz e um prisma que divide a luz em diferentes intervalos de comprimentos de onda. O FR é medido por um sensor, obtendo um espectro de reflectância contínuo no intervalo de comprimentos de onda medido pelo instrumento (DUCART, 2004).

Atualmente, existem vários espectrorradiômetros de reflectância, sendo os mais utilizados o FieldSpec Full Resolution, produzido pela ASD-Analytical Spectral Devices (EUA), e o PIMA, produzido pela Integrated Spectronics Pty. Ltd (Austrália), sendo que o primeiro cobre um intervalo espectral mais amplo (0,350-2,500  $\mu\text{m}$ ) em relação ao segundo (1,300-2,500  $\mu\text{m}$ ) (DUCART, 2004).

No que se refere à espectroscopia de imageamento, o sensor multiespectral ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) foi lançado em dezembro de 1999, a bordo da plataforma TERRA, como parte do programa Earth Observing System (EOS). Este sensor, com dimensões de 60 x 60  $\text{km}^2$  de cena imageada, é constituído por três sub-sistemas de imageamento independentes que coletam dados em várias intervalos do espectro electromagnético conforme Tabela 4.2.

Os dados multiespectrais do sensor ASTER têm sido utilizados com sucesso em diversos estudos voltados ao mapeamento geológico e à caracterização de determinados minerais associados a depósitos minerais.

Em nível mundial, vários são os estudos aplicados na área de espectroscopia de reflectância, aliando ou não espectroscopia de imageamento. Minerais de alteração hidrotermal com feições espectrais de absorção diagnósticas na faixa do VNIR e SWIR podem ser identificados em imagens multiespectrais e hiperespectrais sendo bastante utilizadas nas primeiras etapas de campanhas de exploração de depósitos minerais, incluindo

os tipos Cu-pórfiro e epitermais de metais preciosos (HUNT, 1979; HERRMANN *et al.*, 2001; YANG *et al.*, 2001; SUN; SECCOMBE; YANG, 2001; CARRANZA; HALL, 2002; TANGESTANI; MOORE, 2002; KRUSE; BORDMAN; HUNTINGTON, 2003; DUCART, 2004; JONES; HERMANN; GEMMELL, 2005; YANG *et al.*, 2005; MARS; ROWAN, 2006, 2010; DI TOMMASO; RUBINSTEIN, 2007; YUJUN; JIANMIN; FOJUN, 2007; ZHANG; PANZER; DUKE, 2007; MOORE *et al.*, 2008; TANGESTANI *et al.*, 2008; BEDINI; VAN DER MEER; VAN RUITENBEEK, 2009; HERRMANN *et al.*, 2009; DOUBLIER; ROACHE; POTEL, 2010; GABR; GHULAM; KUSTY, 2010; LAUKAMP *et al.*, 2011; POUR; HASHIM, 2011; POUR; HASHIM; MARGHANY, 2011).

**Tabela 4.2: Características principais do sensor ASTER (<http://asterweb.jpl.nasa.gov>).**

| Sub-sistema                               | Banda                | Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ ) | Resolução espacial (m) |
|---|----------------------|---------------------------------------|------------------------|
| VNIR<br>(visível e infravermelho próximo) | 1                    | 0,520 - 0,600                         | 15                     |
|   | 2                    | 0,630 - 0,690                         |                        |
|   | 3B E 3N (estereopar) | 0,760 - 0,860                         |                        |
|   | 4                    | 1,600 - 1,700                         |                        |
| SWIR (infravermelho de ondas curtas)      | 5                    | 2,145 - 2,185                         | 30                     |
|   | 6                    | 2,185 - 2,225                         |                        |
|   | 7                    | 2,235 - 2,285                         |                        |
|   | 8                    | 2,295 - 2,365                         |                        |
|   | 9                    | 2,360 - 2,430                         |                        |
|   | 10                   | 8,125 - 8,475                         |                        |
| TIR (infravermelho termal)                | 11                   | 8,475 - 8,825                         | 90                     |
|   | 12                   | 8,925 - 9,275                         |                        |
|   | 13                   | 10,250 - 10,950                       |                        |
|   | 14                   | 10,950 - 11,650                       |                        |

Recentemente, Pour e Hashim (2012) publicaram uma revisão sobre as características do sensor ASTER, os produtos e as aplicações das mais recentes técnicas de processamento digital de imagem ASTER como uma ferramenta para o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal associadas a depósitos do tipo Cu-pórfiro e epitermais de ouro e rochas hospedeiras. Foi demonstrada a adequação e a crescente utilização, nos últimos anos, dos dados ASTER para a exploração dos tipos de depósitos enfocados em nível mundial.



Na área de estudo, os trabalhos relacionados a sensoriamento remoto versam sobre a utilização de imagens LANDSAT para o mapeamento geológico-estrutural da região (OHARA, 1981; ALMEIDA *et al.*, 1997; KAZMIERCZAK, 2006).

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

A partir da definição a área de estudo, a pesquisa desenvolvida compreendeu seis etapas principais, desde a revisão bibliográfica até a integração e análise dos dados.

### **5.1. Revisão Bibliográfica e Sistematização de Dados Existentes**

Nesta etapa foram coletados os dados sobre a área de estudo decorrentes de trabalhos anteriormente desenvolvidos, contemplando o conhecimento geológico existente: contextualização geológica regional, unidades litoestratigráficas mapeadas, afloramentos descritos, tipologia de depósito mineral, análises petrográficas/mineralógicas de amostras da região e base cartográfica/temática a ser utilizada.

Também foram coletadas amostras físicas da região de estudo, para avaliação da possível utilização, em etapa posterior, para medições dos espectros.

Foi efetuado, também, o levantamento bibliográfico da espectroscopia de reflectância aplicada a caracterização de depósitos minerais (epitermais e suas alterações hidrotermais); da utilização de bibliotecas espectrais e exemplos existentes em zonas hidrotermais; do estudo de técnicas de processamento digital aplicadas a imagens de sensores multiespectrais e o seu emprego no mapeamento de zonas de alteração hidrotermal.

### **5.2. Estruturação do Banco de Dados em Sistema de Informações Geográficas (SIG)**

As informações levantadas foram sistematizadas em SIG no ArcGis™ Desktop 10.1 para espacialização e visualização dos dados, bem como para apoio aos trabalhos de campo desenvolvidos na sequência, utilizando a base cartográfica, os dados geológicos obtidos para localização e caracterização dos afloramentos/amostras de rocha, as composições da cena ASTER. No desenvolvimento da pesquisa, o SIG foi continuamente alimentado com os novos dados adquiridos a fim de facilitar a integração e interpretação dos mesmos.

### **5.3. Trabalhos de Campo e Coleta de Amostras**

Foram realizadas campanhas de campo para reconhecimento geológico da área estudada, descrição dos afloramentos e coleta de amostras georreferenciadas (anexos A e B).

#### 5.4. Aquisição e Análise de Dados Espectrais

As leituras espectrais foram realizadas em laboratório, nas dependências da CPRM, em São Paulo, através do espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution* com alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 a 2500 nm) num total de 2101 bandas. As medidas, registradas em valores de reflectância proporcional relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa (do tipo *Spectralon*), foram feitas por meio de sonda de contato. Cada amostra foi submetida a várias análises, numa média de 3, procurando-se medir uma assinatura espectral para cada categoria diferente de face conforme a variação do tipo (exposta, quebra natural ou serrada), grau de intemperismo, cor, relação angular com a foliação ou bandamento principal e relação matriz-megacristais, quando pertinente (anexos A e B).

A análise e interpretação das curvas espectrais foram efetuadas visando determinar a mineralogia de cada amostra, proporções dos minerais nas curvas resultantes de misturas, o ordenamento estrutural dos minerais (por exemplo, a cristalinidade da illita), e as composições químicas dentro de um mesmo mineral (por exemplo, a variação de Fe e Mg nas cloritas).

A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi efetuada através da utilização do software *The Spectral Geologist* (TSG<sup>TM</sup>Pro), desenvolvido pela *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), comercializado e distribuído pela AusSpec International, ambas australianas, que permite a discriminação das fases minerais presentes por comparação das feições de absorção no espectro analisado com feições similares de minerais de uma biblioteca espectral de referência. Identificados os minerais presentes, uma desmistura das fases é calculada, resultando na proporção estimada de cada mineral, e uma curva espectral hipotética é gerada graficamente para comparação com o espectro analisado.

#### 5.5. Seleção e Processamento Digital de Cena ASTER

Nesta etapa, foi realizado o processamento digital de uma cena do sensor orbital multiespectral ASTER, nível L1B, com data de passagem em 03/09/2003, que recobre a área estudada, com o objetivo principal de mapear a mineralogia principal das zonas de alteração. Foram utilizadas duas bandas do visível (VIS) e uma do infravermelho próximo (NIR), centradas respectivamente em 556, 661 e 807 nanômetros e com resolução espacial de 15 m; e

seis bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), centradas respectivamente em 1650, 2167, 2209, 2262, 2336 e 2400 nm e com resolução espacial de 30 m.

O pré-processamento da imagem ASTER envolveu (PERROTA *et al.*, 2013): a correção do efeito de *cross-talk*, através do programa CRSTK30 (ERSDAC, 2003); a ortorretificação da cena, utilizando-se o modelo digital de terreno extraído diretamente das bandas 3N e 3B; o agrupamento das bandas do espectro refletido num único arquivo, com reamostragem dos pixels das bandas do SWIR por método do vizinho mais próximo para a resolução de 15 m, compatível com a resolução das bandas do VNIR; o recorte na área de interesse; a compensação atmosférica dos dados, por modelo de transferência radiativa MODTRAN (Moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm), complementando-se os parâmetros atmosféricos com dados de cena de mesma passagem do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), o que eleva a acurácia da correção e transforma os dados em valores de reflectância aparente.

Para a classificação espectral foi rodado o algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) no ENVI™ que mede a similaridade entre os espectros de cada pixel da imagem com os espectros de referência provenientes de bibliotecas espectrais, ou de amostras selecionadas em campo ou laboratório (KRUSE *et al.*, 1993, BOARDMAN; KRUSE; GREEN, 1995). Na área de estudo foram utilizados os espectros de referência do USGS disponíveis no ENVI™ e os medidos em laboratório, ambos reamostrados para a resolução espectral do sensor.

## **5.6. Integração e Análise dos Dados**

Esta etapa consistiu na avaliação da aplicabilidade das técnicas de espectroscopia de reflectância e de processamento da imagem de satélite em campanhas de exploração mineral na região.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Artigo Científico 1: Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimentais

R. B. Binotto<sup>1,2</sup>; D. L. Saldanha<sup>1</sup>; A.R.A.Dias<sup>3</sup>; M. M. Perrotta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: raquel.binotto@cprm.gov.br, dejanira.saldanha@ufrgs.br.

<sup>2</sup>Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de Porto Alegre, Ministério de Minas e Energia, Rua Banco da Província, 105, CEP 90840-030, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: raquel.binotto@cprm.gov.br.

<sup>3</sup>Votorantim Metais. Rua Luiz Benezato, 500, Polo Industrial Multivias, CEP 13212-161, Jundiá, SP, Brasil, E-mail: aline.anjos@vmetais.com.br.

<sup>4</sup>Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de São Paulo, Ministério de Minas e Energia. Rua Costa, 55, CEP 01304-010, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: monica.perrotta@cprm.gov.br.

**Resumo** - Uma série de análises espectrais foi efetuada em amostras de rochas sedimentares eopaleozoicas afetadas por alteração hidrotermal associada às ocorrências de cobre na Mina Uruguai (Minas do Camaquã, RS). A base de dados contemplou espectros na faixa do visível e infravermelho próximo (350 a 2500 nm) obtidos através de leituras em um espectrorradiômetro portátil ASD FieldSpec-3 *High-Resolution*. A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi efetuada com o apoio do *software* The Spectral Geologist (TSG<sup>TM</sup> Pro) que permitiu a discriminação das fases minerais presentes por comparação das feições de absorção no espectro analisado com feições similares de minerais de uma biblioteca espectral de referência. A partir da análise espectral das amostras da área de estudo, puderam ser identificados os seguintes minerais principais: caulinita, illita, clorita, hematita e goetita. As assembleias minerais identificadas se mostraram consistentes com alteração hidrotermal sob condições epitermais de baixo enxofre descrita em estudos anteriores na região. Os resultados obtidos reforçaram o potencial de utilização da espectroscopia de reflectância em programas de exploração mineral, especialmente nas fases iniciais, mesmo em áreas com condições fisiográficas pouco favoráveis.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, espectroscopia de reflectância, alteração hidrotermal, cobre.

**Abstract** – IDENTIFICATION OF HYDROTHERMAL ALTERATION SPECTRAL PATTERNS IN URUGUAI MINE, CAÇAPAVA DO SUL, RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL, USING EXPERIMENTAL REFLECTANCE SPECTRA. A series of spectral analysis was made with samples of Eopaleozoic sedimentary rocks affected by hydrothermal alteration associated with occurrences of copper in Uruguai Mine (Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul State, Brazil). The database included spectral range visible, near infrared and shortwave (350-2500 nm) obtained from measurements of portable spectroradiometer ASD FieldSpec-3 High-Resolution. The mineralogical interpretation with spectral signatures was conducted with a support by The Spectral Geologist (TSG<sup>TM</sup> Pro) software, which allows a mineral phases discrimination present by comparing the absorption features in the mineral analysis with similar features of a spectral reference library spectrum. Spectral analysis from studied area samples allowed identified these main minerals: kaolinite, illite, chlorite, hematite and goethite. The mineral assemblages identified were consistent with hydrothermal alteration under conditions of low sulphur epithermal described in previous studies in this region. The results supported a potential use of reflectance spectroscopy in mineral exploration programs, especially in the early stages, even in areas with little favorable physiographic conditions.

**Keywords:** remote sensing, reflectance spectroscopy, hydrothermal alteration, copper.

## 1. Introdução

A espectroscopia de reflectância na região do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (VNIR e SWIR) tem sido utilizada como um método rápido e não destrutivo na exploração mineral para a identificação de padrões hidrotermais em diferentes depósitos (Hunt & Ashley, 1979; Herrmann *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Jones *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005; Cudahy *et al.*, 2009; Herrmann *et al.*, 2009; Doublier *et al.*, 2010; Laukamp *et al.*, 2011). No Brasil, a concepção, elaboração e operacionalização da Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil, coordenada pela Divisão de Sensoriamento Remoto (DISERE/CPRM), está em processo de implantação, cujos dados tem sido utilizados em diferentes estudos nas mais diversas aplicações (Perrota, 2004; Perrota *et al.*, 2005, 2012, 2013, 2014; Bergmann *et al.*, 2008, 2009; Justo *et al.*, 2012, 2013).

A abundância, composição e grau de cristalinidade de certos minerais podem ser inferidos pela profundidade, posição e forma de feições de absorção características na região do SWIR (Sonntag *et al.*, 2012).

As curvas espectrais de reflectância dos minerais exibem feições diagnósticas em diferentes comprimentos de onda que permitem sua discriminação e identificação. Estas feições são produzidas por processos eletrônicos ou vibracionais resultantes da interação entre a energia com os átomos/moléculas que formam os minerais. Os espectros dos diferentes minerais são combinados para formar a assinatura espectral de determinada rocha. Os espectros de reflectância dos minerais em comprimentos de onda inferiores a 1000 nm são dominados por processos envolvendo metais de transição, sendo o Ferro o mais comum na superfície da Terra. Assim, nos espectros das rochas na faixa de 400 a 1000 nm predominam feições associadas a minerais contendo óxidos de ferro. Entre 1000 e 2500 nm, são características nos espectros dos minerais combinações envolvendo o íon hidroxila (OH), resultando na discriminação de feições espectrais características dos minerais de argila. Os carbonatos também apresentam várias feições espectrais nesta faixa envolvendo combinações entre o Carbono e o Oxigênio (Hook *et al.*, 1994).

Considerando que a estabilidade de cada mineral e das assembleias minerais depende de parâmetros físico-químicos, tais como temperatura, pressão e pH, sua ocorrência associada

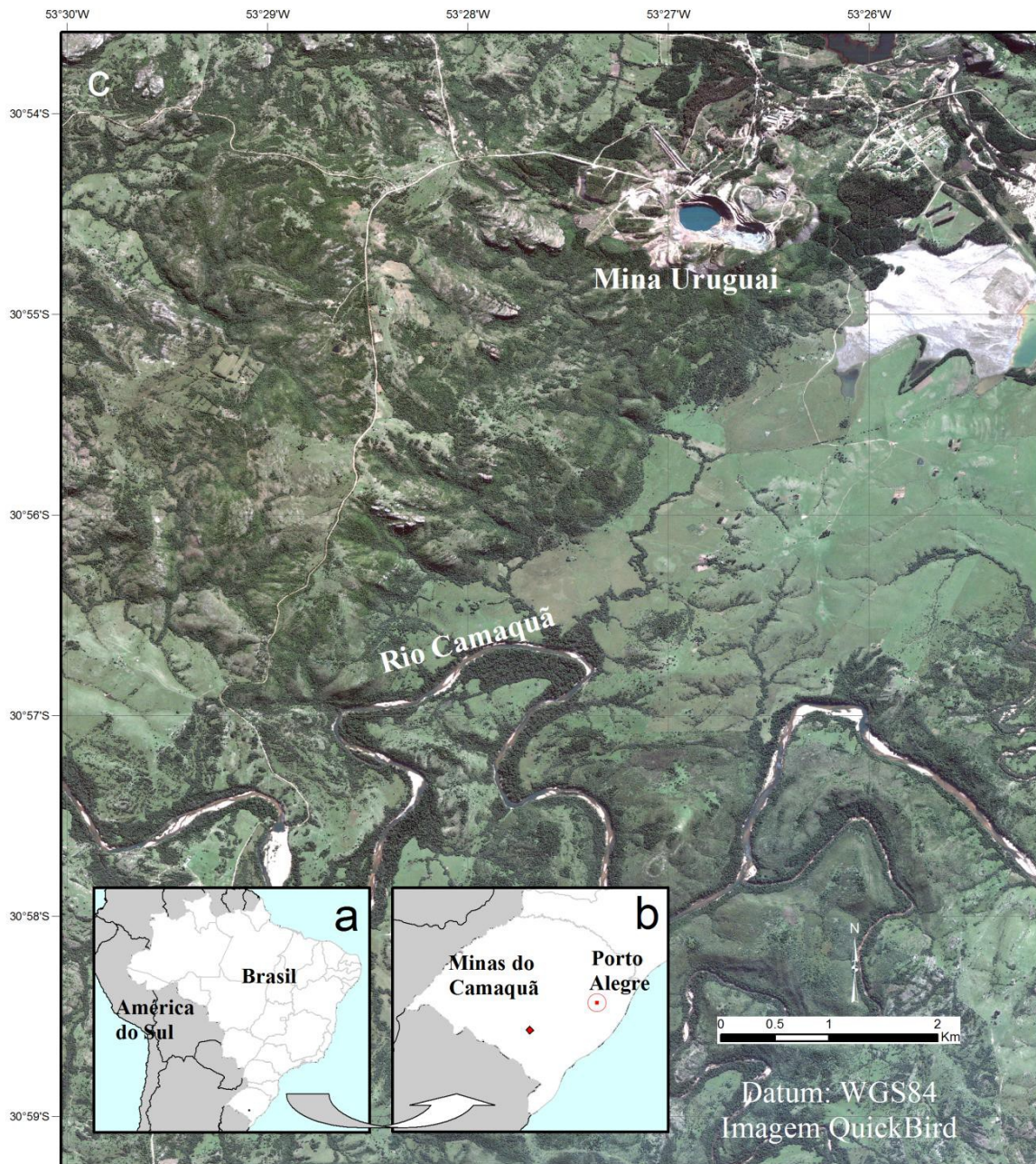
às diferentes zonas de alteração hidrotermal é indicativa dos processos formadores do depósito, fornecendo informações importantes sobre o tipo e localização do minério.

Por exemplo, em depósitos de cobre pórfiro, filossilicatos hidrotermais como muscovita, illita e clorita são considerados essenciais na identificação e entendimento das zonas de alteração. A identificação dos diferentes tipos de micas e argilominerais formados em sistemas hidrotermais em amostras de mão utilizando ferramentas comuns (lupas de mão) é difícil. O termo “sericita” é comumente utilizado nas campanhas de campo para se referir aos minerais finamente granulares do grupo das micas brancas. Embora o grupo de minerais da clorita possa ser identificado em amostras de mão, tipos composicionais específicos do grupo que distinguem o tipo de alteração também não podem ser identificados através de métodos comumente utilizados no campo (Cohen, 2011).

Neste contexto, no presente artigo é caracterizada espectralmente a alteração hidrotermal associada às ocorrências de cobre na Mina Uruguai, depósito de Cu (Au/Ag), cujo modelo genético mais característico é do tipo epitermal de baixo enxofre (Laux *et al.*, 2005), a partir da análise qualitativa e quantitativa de dados de espectroscopia de reflectância. O padrão espectral da alteração hidrotermal do depósito estudado poderá ser reconhecido em outros alvos de interesse em estudos futuros na região.

## **2. Área, materiais e métodos**

A área de estudo está situada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, na localidade de Minas do Camaquã, a aproximadamente 350 km da capital do estado, Porto Alegre, com acesso através da BR-153. As coordenadas de referência da Mina Uruguai são 30°54'34" Sul e 53°26'37" Oeste (**Fig. 1**).



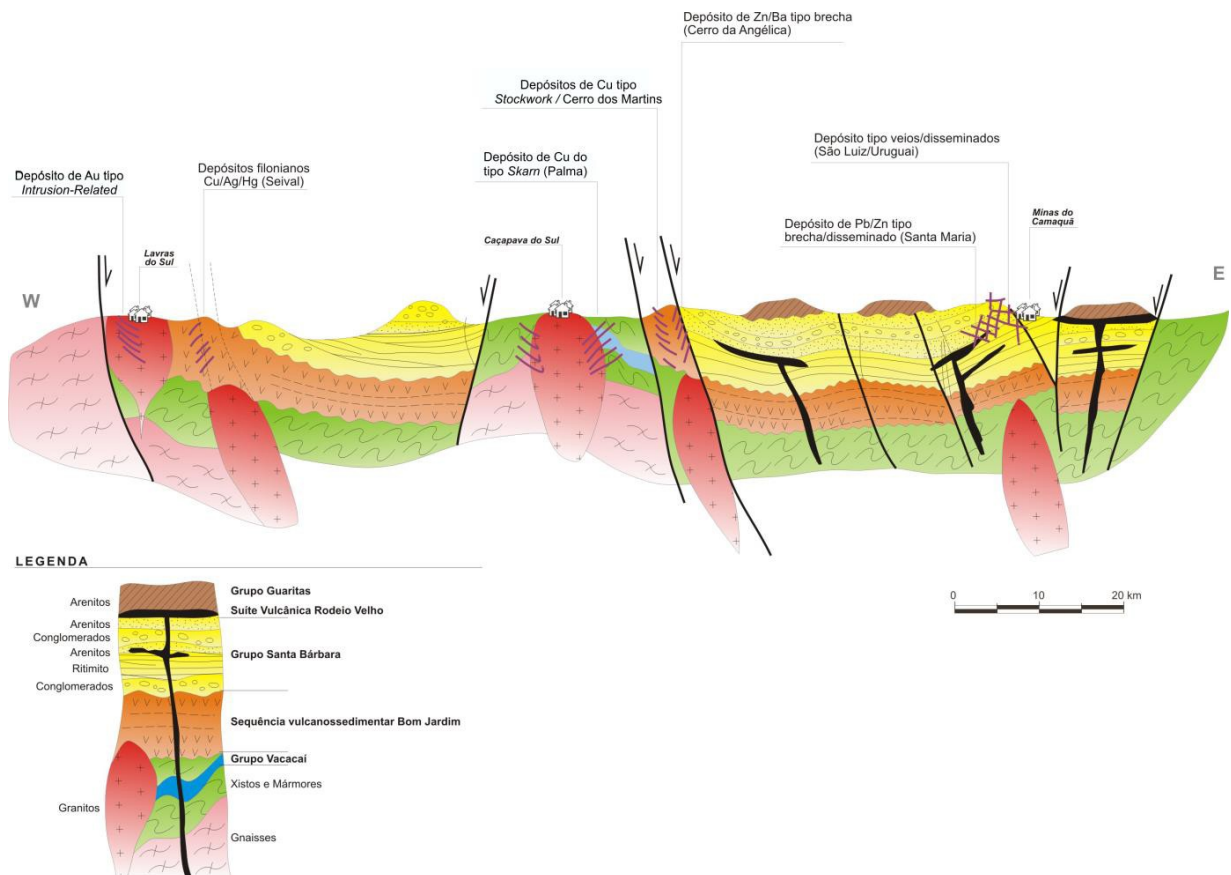
**Fig. 1:** Localização da área de estudo: a) Situação no país; b) Situação no estado do Rio Grande do Sul e em relação à capital, Porto Alegre; c) Mina Uruguai, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil.



## 2.1. Contexto geológico

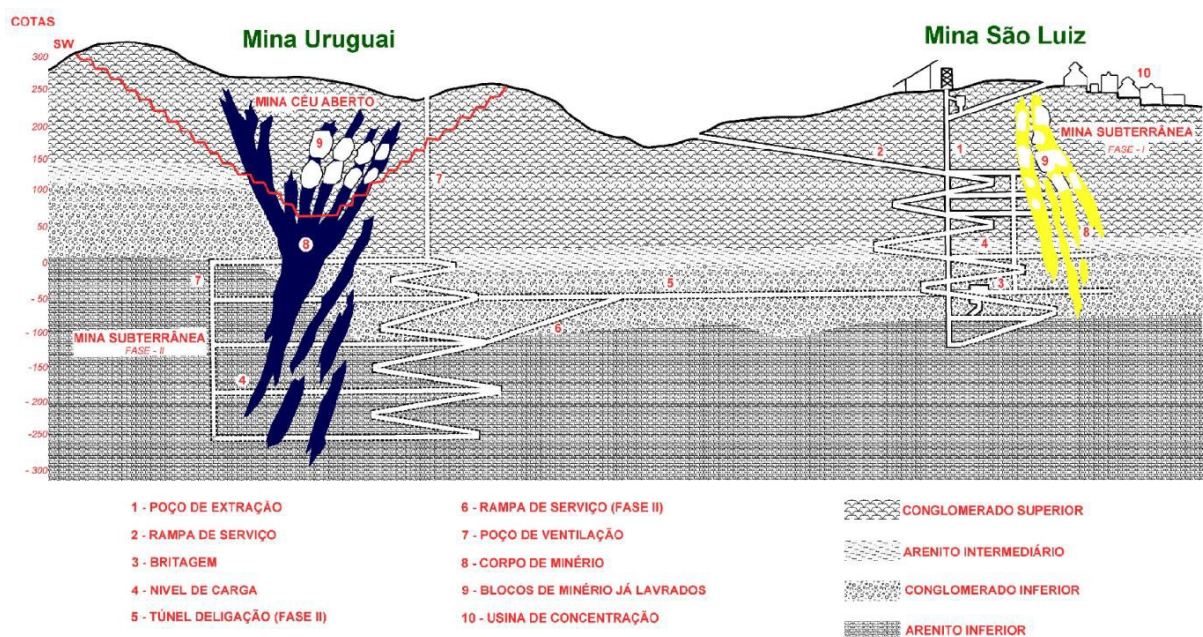
As Minas do Camaquã estão localizadas em um gráben com direção geral nordeste, identificando-se dois sistemas de falhas principais, um regional, com direção nordeste (N20°-30°E), responsável pelos limites e compartimentação longitudinal do gráben, e outro controlando as principais estruturas mineralizadas, noroeste (N50°-70°W) (Troian, 2009).

No contexto geológico regional, as rochas, na região das minas do Camaquã, inserem-se no Grupo Santa Bárbara (Fambrini, 2003) (**Fig. 2**), de idade eopaleozoica, cujas rochas sedimentares classicamente são relacionadas à Formação Arroio dos Nobres por outros autores (e.g., Ribeiro *et al.*, 1966; Gonzalez & Teixeira, 1980; Paim *et al.*, 1992), membros Mangueirão e Vargas, sendo as rochas deste último hospedeiras das mineralizações de Cu-Pb-Zn.



**Fig. 2:** Contexto geológico da área de estudo: Mina Uruguai, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil (Lago, 2013).

O Membro Vargas é constituído por um pacote de arenitos e conglomerados, com mergulho em torno de N30°E, tendo sido subdividido, na área das minas do Camaquã, da base para o topo, em cinco unidades litológicas (**Fig. 3**): Arenito Inferior, Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário, Conglomerado Superior e Arenito Superior. Com exceção do Arenito Superior, as demais unidades apresentam mineralizações (Bettencourt, 1972; Teixeira *et al.*, 1978ab; Gonzalez & Teixeira, 1980).



**Fig. 3:** Arranjo geral das instalações das minas Uruguai e Santa Maria, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil (Lago, 2013).

As minas do Camaquã compreendem dois corpos de minério denominados de Mina Uruguai (minas a céu aberto e subterrânea) e Mina São Luiz (subterrânea) (**Fig. 3**). Conforme descrito nos trabalhos de Teixeira *et al.* (1978a,b), Laux (1999) e Troian (2009), o minério das minas do Camaquã ocorre sob duas formas: em filões e disseminações. Os filões preenchem falhas, apresentando os sulfetos sob forma maciça ou em massas irregulares no interior de ganga de quartzo, hematita, clorita, calcita e barita. A margem dos veios está marcada por intensa alteração hidrotermal representada por silicificação, cloritização, caulinição e sulfetação, ocorrendo quartzo, pirita, calcopirita, bornita, hematita e Au. Calcita e barita

representam a mineralogia tardia, ocorrendo disseminadas e como veios com até 15 cm de espessura nos arenitos e conglomerados. O minério disseminado ocorre nos conglomerados e arenitos, sendo interpretado por diversos autores como parte das zonas de alteração hidrotermal que se desenvolveram no entorno dos veios, representando a manifestação lateral do controle estrutural da mineralização, com os sulfetos ocupando a porosidade secundária da rocha encaixante. Próximo da superfície há uma zona de oxidação, onde o minério contém pequenas quantidades de ouro e prata. A paragênese é simples, constituída principalmente por sulfetos de cobre: calcopirita, bornita e calcosita, além de pirita.

## 2.2. Técnicas e dados utilizados

### 2.2.1 Campanhas de campo

Na região de estudo foram efetuadas duas campanhas de campo para reconhecimento geológico e coleta de amostras de rocha (tabelas 1 e 2), abrangendo a área das minas do Camaquã e o escritório/depósito da Votorantim Metais, onde estão armazenados os testemunhos de sondagem.

**Tab. 1:** Relação e características principais de amostras de rocha (afloramentos) utilizadas no estudo, Mina Uruguai, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil.

| Amostra       | Latitude   | Longitude  | Rocha                  | Alteração   |
|---------------|------------|------------|------------------------|---|
| 2760-RB-R-001 | -30.910575 | -53.443241 | Arenito                | Halo de alteração com veios de hematita e barita                              |
| 2760-RB-R-002 | -30.910541 | -53.443279 | Arenito                | Halo de alteração com veios de barita   |
| 2760-RB-R-003 | -30.910094 | -53.443583 | Conglomerado           | Halo de alteração com clorita   |
| 2760-RB-R-004 | -30.909650 | -53.443937 | Arenito                | Halo de alteração com sericita (ilita)  |
| 2760-RB-R-005 | -30.909848 | -53.443682 | Arenito conglomerático | Halo de alteração com clorita/oxidação  |
| 2760-RB-R-006 | -30.910621 | -53.442735 | Arenito conglomerático | Halo de alteração com clorita   |
| 2760-RB-R-007 | -30.910156 | -53.442162 | Conglomerado           | Halo de alteração com clorita   |
| 2760-RB-R-008 | -30.909681 | -53.442788 | Conglomerado           | Halo de alteração com clorita   |
| 2760-RB-R-009 | -30.908125 | -53.444342 | Conglomerado           | Conglomerado superior, fora da mina (sem ou com menor influência hidrotermal) |
| 2760-RB-R-017 | -30.899016 | -53.433739 | Conglomerado           | Arenito/conglomerado fora da mina (sem ou com menor influência hidrotermal)   |

**Tab. 2:** Relação e características principais de amostras de rocha (testemunhos de sondagem) utilizadas no estudo, Mina Uruguai, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil.

| Amostra        | Profundidade (m) | Rocha                                   | Alteração  |
|----------------|------------------|---|--|
| U408834-R-001  | 12.12            | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita   |
| U408834-R-002  | 16.02            | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita   |
| U408834-R-003  | 21.26            | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita  |
| U408834-R-004  | 27.13            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita   |
| U408834-R-005  | 37.55            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Zona de brecha (sulfetos e rocha hospedeira cimentados por quartzo e hematita)   |
| U408834-R-006  | 38.95            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita   |
| U408834-R-007  | 46.53            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita   |
| U408834-R008   | 50.35            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita  |
| U408834-R-009  | 57.55            | Arenito grosso a arenito médio          | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita  |
| U7SR0277-R-001 | 74.15            | Arenito grosso a arenito médio          | Halo de alteração com cloritana matriz (pirita / calcopirita / bornita podem estar associadas)   |
| U7SR0277-R-002 | 96.08            | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita   |
| U7SR0277-R-003 | 120.50           | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita   |
| U7SR0277-R-004 | 122.10           | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita  |
| U7SR0277-R-005 | 137.15           | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita   |
| U7SR0277-R-006 | 161.40           | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração cloríticapervasiva com pirita + calcopirita disseminadas, cortado por veios e vênulas de quartzo, calcopirita + pirita (bornita) |

Fonte: Laux (1999)

### 2.2.2 Análises espectrais

As análises espectrais foram realizadas em laboratório, nas dependências da CPRM, em São Paulo, através do espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution* com alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 a 2500 nm) e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1400 nm) e 6,5 nm (em 2500 nm) num total de 2101 bandas. As medidas, registradas em valores de reflectância proporcional relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa (do tipo *Spectralon*), foram feitas por meio de sonda de contato. Cada amostra foi submetida a várias análises, numa média de 3, procurando-se medir uma assinatura espectral para cada categoria diferente de face conforme

a variação do tipo (exposta, quebra natural ou serrada), grau de intemperismo, cor, relação angular com a foliação ou bandamento principal e relação matriz-cristais, quando pertinente.

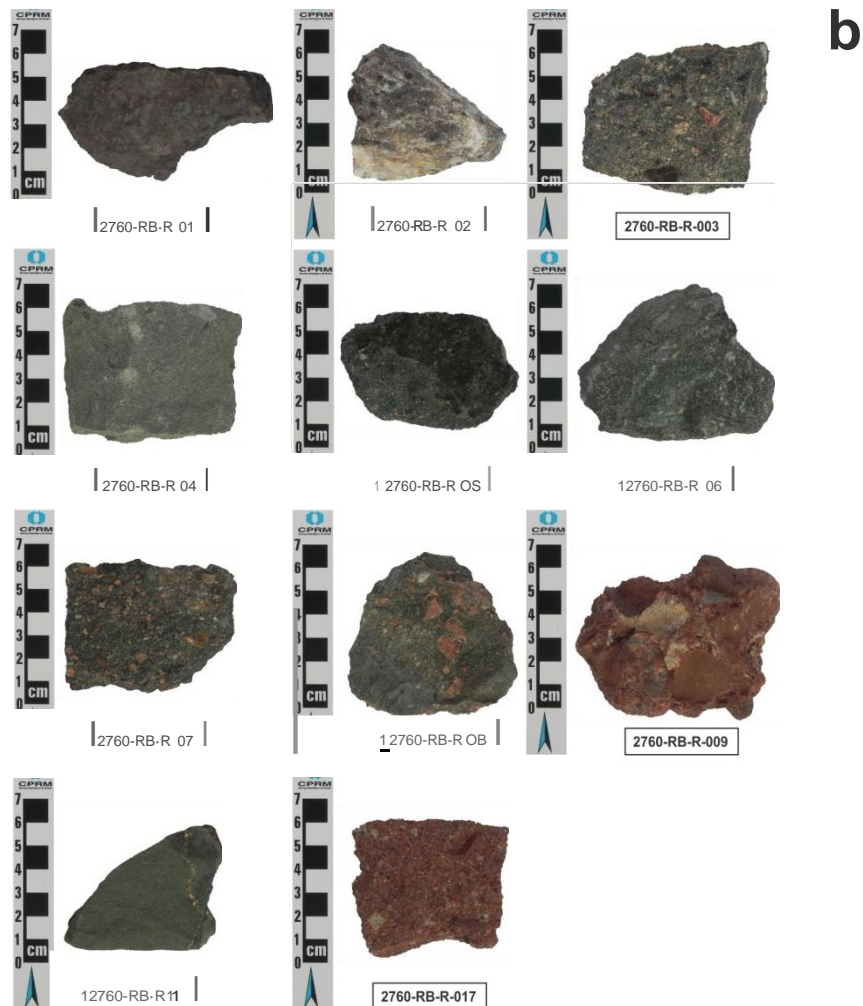
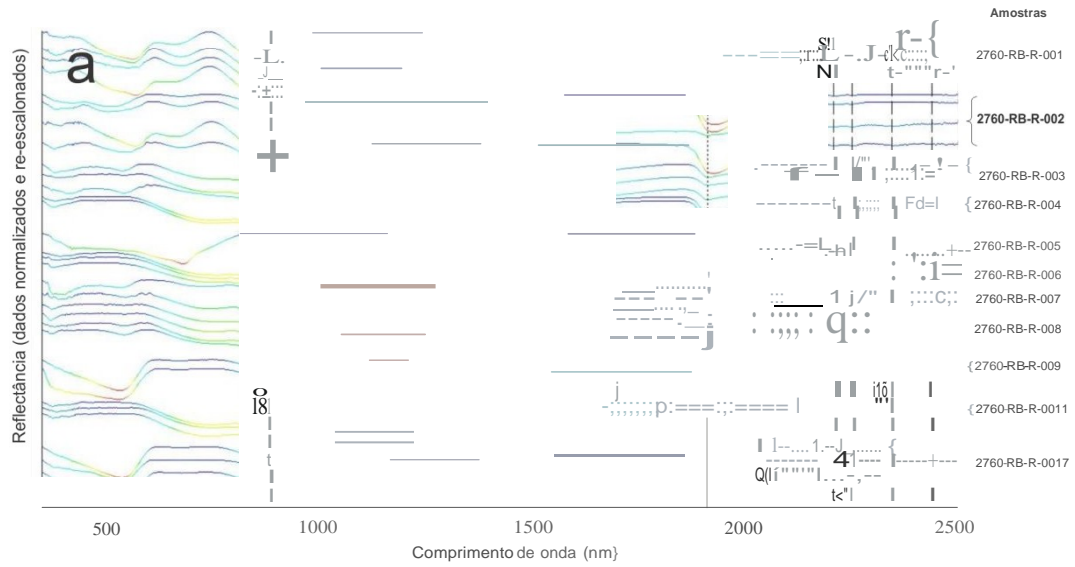
A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi efetuada através da utilização do software *The Spectral Geologist (TSG<sup>TM</sup>Pro)*, desenvolvido pela *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)*, comercializado e distribuído pela *AusSpec International*, ambas australianas, que permite a discriminação das fases minerais presentes por comparação das feições de absorção no espectro analisado com feições similares de minerais de uma biblioteca espectral de referência. Identificados os minerais presentes, uma desmistura das fases foi calculada, resultando na proporção estimada de cada mineral, e uma curva espectral hipotética foi gerada graficamente para comparação com o espectro analisado. Como as análises espectrais são puramente qualitativas, de caráter interpretativo, foram selecionados os espectros mais representativos das fases minerais típicas das assembleias de alteração hidrotermal estudadas, que serão discutidos neste artigo.

### 3. Resultados

As assinaturas espectrais medidas nas amostras de rochas sedimentares eopaleozoicas (arenitos e conglomerados) afetadas por alteração hidrotermal podem ser visualizadas nas **figuras 4, 5 e 6**, onde estão ressaltadas as principais feições espectrais (absorção) observadas.

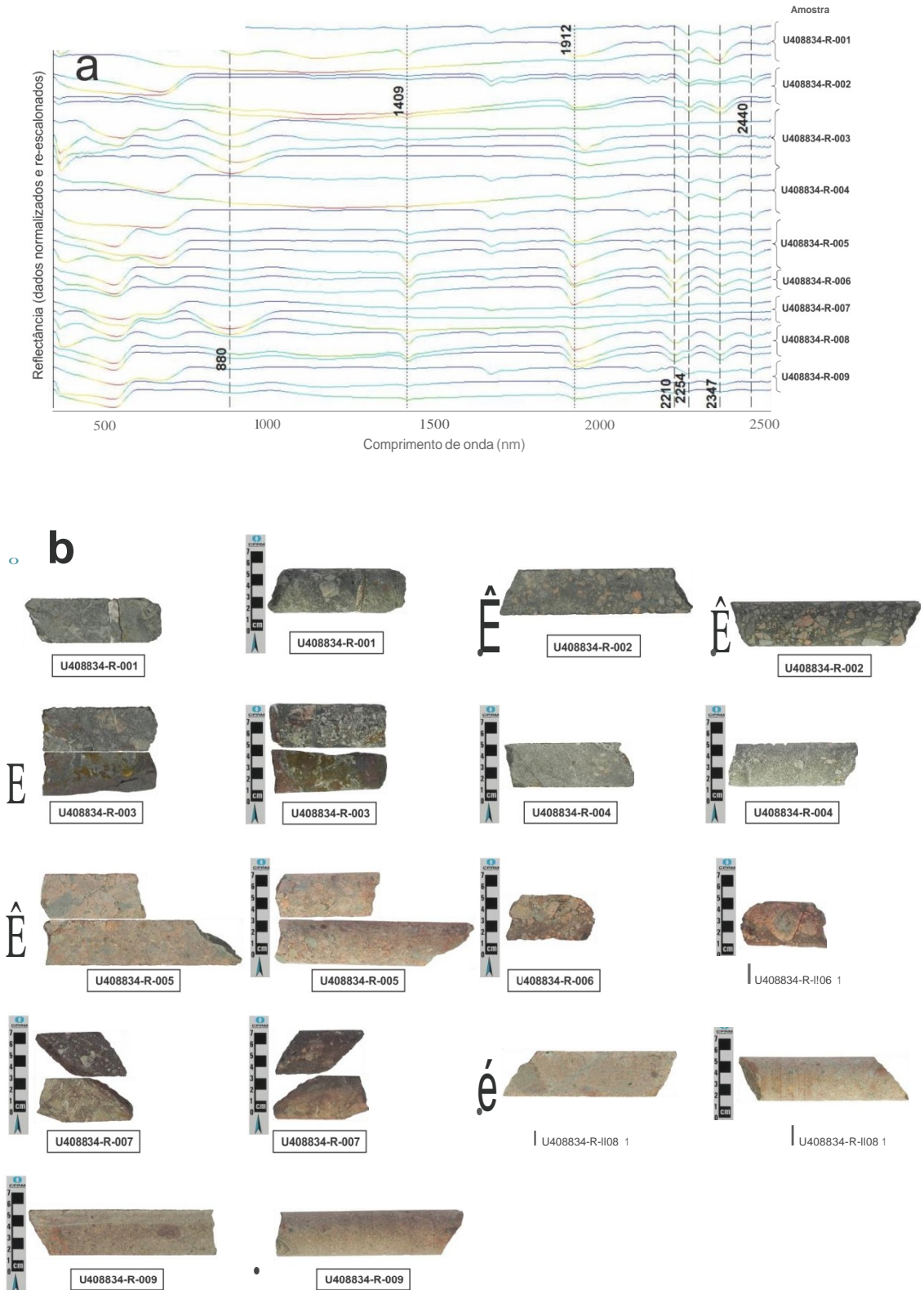
Apesar dos valores de reflectância relativa estarem situados, em sua grande maioria, até 0,3, é possível identificar feições de absorção quando estes espectros são estudados com remoção de contínuo, conforme representado nas curvas espectrais das figuras já citadas. A remoção do contínuo é uma forma de normalizar espectros de reflectância para permitir a comparação de feições de absorção individuais, a partir de uma linha do contínuo comum.

As feições de absorção aparecem no espectro de reflectância como “depressões” e correspondem a regiões do intervalo de comprimentos de onda onde a luz é absorvida devido a ligações moleculares específicas do material alvo. A posição e a profundidade de uma feição, ou razão de profundidades entre duas feições, podem servir para estabelecer a mineralogia das zonas de alteração.

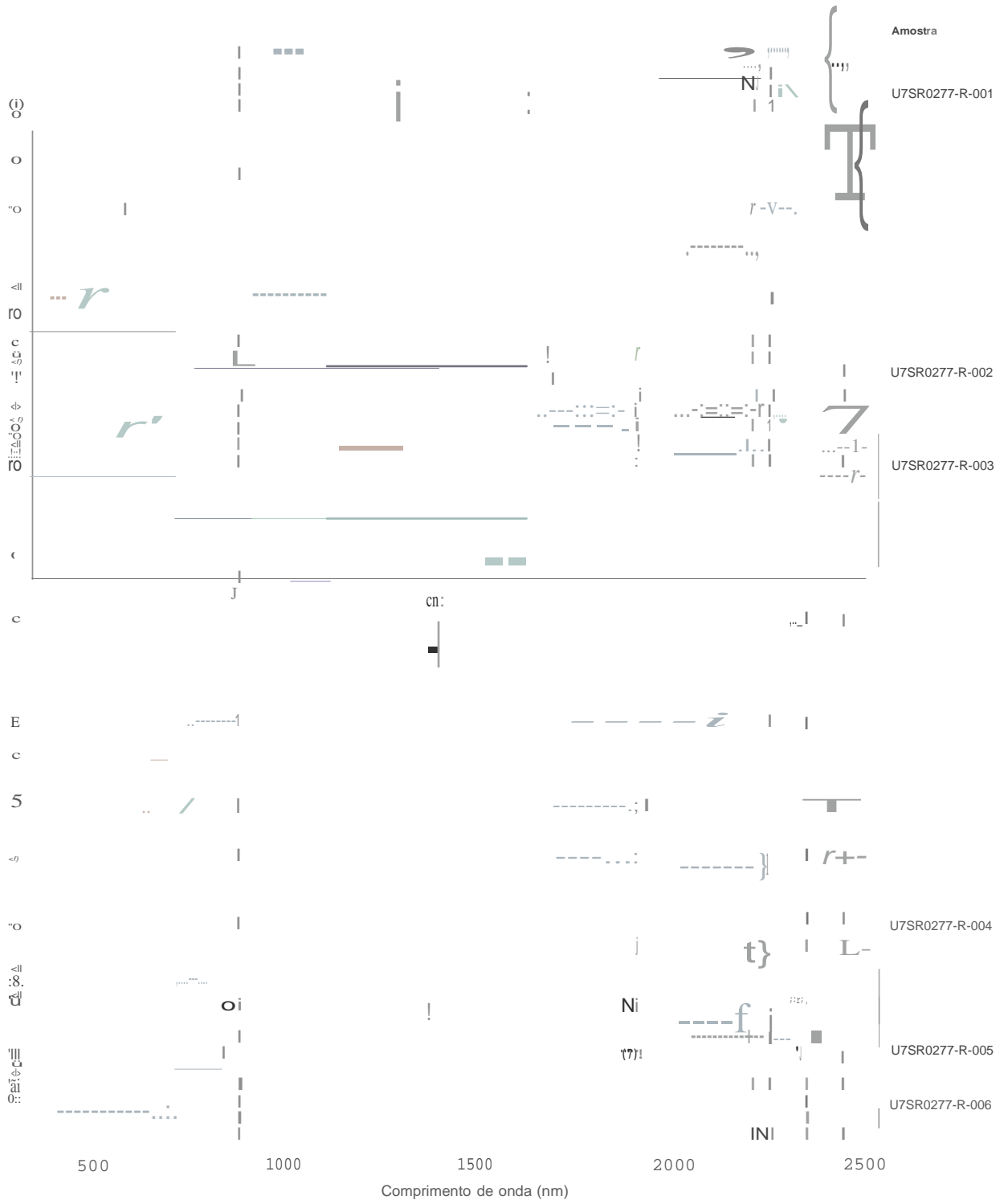


**Fig. 4:** Assinaturas espectrais das amostras de rocha (afloramentos) da área de estudo, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil. a) Curvas espectrais; b) Amostras de rocha.

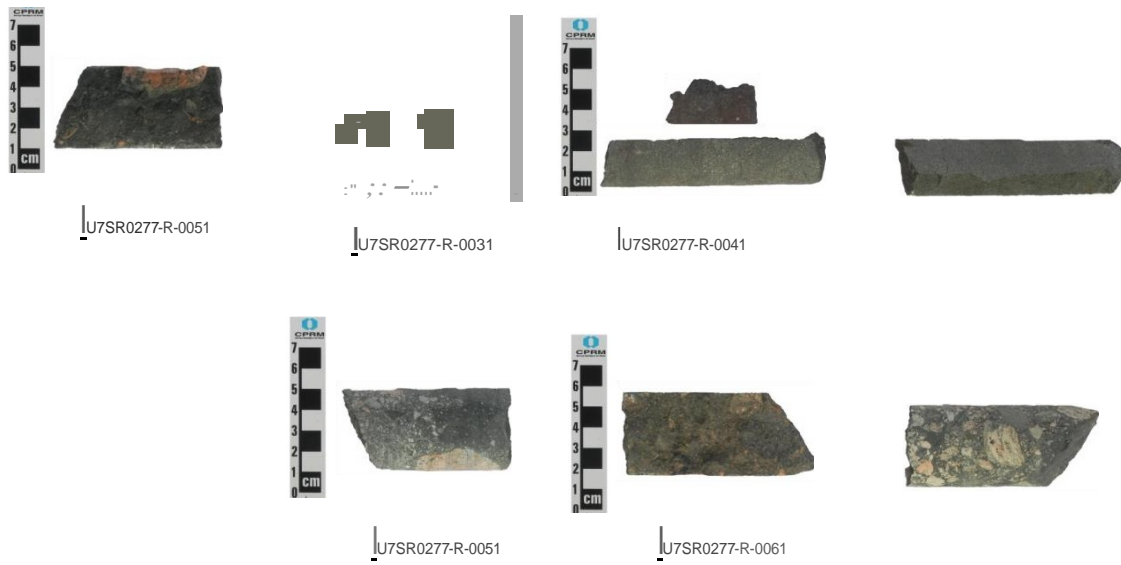




**Fig. 5:** Assinaturas espectrais das amostras de rocha (testemunho de sondagem U408834) da área de estudo, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil a) Curvas espectrais; b) Amostras de rocha.







**Fig. 6:** Assinaturas espectrais das amostras de rocha (testemunho de sondagem U7SR0277) da área de estudo, minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil. a) Curvas espectrais; b) Amostras de rocha.

Com base nas feições de absorção ressaltadas nas curvas espectrais, foram reconhecidos, nas amostras estudadas, os minerais relacionados na sequência (tabelas 3 e 4). Os minerais detectados, no geral gerados em processos metamórfico-hidrotermais mineralizantes, constituem indicadores de vários tipos de depósitos, com destaque para os metálicos, conforme discutido no prosseguimento.

**Tab. 3:** Interpretação mineralógica espectral das amostras de rocha (afloramentos) da área de estudo.

| Amostra       | Minerais   |
|---------------|--|
| 2760-RB-R-001 | Hematita   |
| 2760-RB-R-001 | Clorita Férrica, Hematita  |
| 2760-RB-R-001 | Clorita Férrica, Hematita  |
| 2760-RB-R-001 | Hematita   |
| 2760-RB-R-002 | Ilita (Fengita), Hematita  |
| 2760-RB-R-002 | Ilita (Fengita), Hematita/Goetita  |
| 2760-RB-R-002 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita                        |
| 2760-RB-R-002 | Hematita   |
| 2760-RB-R-003 | Clorita Férrica, Caulinita, Goetita  |
| 2760-RB-R-003 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Caulinita                       |
| 2760-RB-R-003 | Ilita (Fengita), Clorita Férrica, Goetita                                  |
| 2760-RB-R-004 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                                  |
| 2760-RB-R-004 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                                  |
| 2760-RB-R-005 | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| 2760-RB-R-005 | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| 2760-RB-R-005 | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| 2760-RB-R-006 | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| 2760-RB-R-006 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                         |
| 2760-RB-R-007 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                         |
| 2760-RB-R-007 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                                  |
| 2760-RB-R-008 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                                  |
| 2760-RB-R-008 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                         |
| 2760-RB-R-008 | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                                  |
| 2760-RB-R-009 | Ilita (Fengita), Hematita  |
| 2760-RB-R-009 | Ilita ("normal" potássica - Muscovita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita |
| 2760-RB-R-017 | Ilita (Fengita), Hematita  |
| 2760-RB-R-017 | Ilita (Fengita), Hematita  |
| 2760-RB-R-017 | Ilita (Fengita), Hematita  |

**Tab. 4:** Interpretação mineralógica espectral das amostras de rocha (testemunhos de sondagem) da área de estudo.

| Amostra<br>(Testemunho) | Profundidade<br>(m) | Minerais   |
|-------------------------|---------------------|--|
| U408834-R-001           | 12,12               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-001           | 12,12               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-001           | 12,12               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-002           | 16,02               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-002           | 16,02               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-002           | 16,02               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-002           | 16,02               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-003           | 21,26               | Sulfeto  |
| U408834-R-003           | 21,26               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-003           | 21,26               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-003           | 21,26               | Hematita   |
| U408834-R-004           | 27,13               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-004           | 27,13               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-004           | 27,13               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U408834-R-005           | 37,55               | Ilita (Fengita), Goetita   |
| U408834-R-005           | 37,55               | Sulfeto  |
| U408834-R-005           | 37,55               | Ilita (Fengita)  |
| U408834-R-005           | 37,55               | Ilita (Fengita)  |
| U408834-R-006           | 38,95               | Ilita (Fengita), Goetita   |
| U408834-R-006           | 38,95               | Ilita (Fengita), Goetita   |
| U408834-R-007           | 46,53               | Hematita   |
| U408834-R-007           | 46,53               | Hematita   |
| U408834-R-007           | 46,53               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita              |
| U408834-R-008           | 50,35               | Ilita (Fengita)  |
| U408834-R-008           | 50,35               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-008           | 50,35               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana                        |
| U408834-R-009           | 57,55               | Hematita/Goetita   |
| U408834-R-009           | 57,55               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita/Goetita      |
| U408834-R-009           | 57,55               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita/Goetita      |
| U7SR0277-R-001          | 74,15               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita/Goetita      |
| U7SR0277-R-001          | 74,15               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita               |
| U7SR0277-R-001          | 74,15               | Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                                |
| U7SR0277-R-002          | 96,08               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Hematita              |
| U7SR0277-R-002          | 96,08               | Sulfeto  |
| U7SR0277-R-002          | 96,08               | Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                                |
| U7SR0277-R-002          | 96,08               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita               |
| U7SR0277-R-003          | 120,5               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U7SR0277-R-003          | 120,5               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U7SR0277-R-003          | 120,5               | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U7SR0277-R-004          | 122,1               | Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                                |
| U7SR0277-R-004          | 122,1               | Hematita   |
| U7SR0277-R-005          | 137,15              | Clorita Ferro-Magnésiana   |
| U7SR0277-R-005          | 137,15              | Ilita ("normal" potássica - Muscovita), Clorita Ferro-Magnésiana |
| U7SR0277-R-006          | 161,4               | Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita                                |
| U7SR0277-R-006          | 161,4               | Ilita (Fengita), Clorita Ferro-Magnésiana, Goetita               |

#### 4. Discussão dos Resultados

A posição, forma, profundidade e largura das feições de absorção são controladas pela estrutura cristalina e composição química dos diferentes minerais, produzidas como consequência de processos eletrônicos (transições atômicas) e vibracionais (transições moleculares) (Hunt, 1977).

Na grande maioria, as análises espectrais das rochas afetadas em graus variáveis por alteração tanto hidrotermal como intempérica, resultam em espectros mistos da combinação de diversos minerais. Feições espectrais diagnósticas normalmente são preservadas nestas misturas de forma que é possível identificar as fases minerais envolvidas. Há que se observar que as feições das curvas espectrais das amostras estudadas geralmente não se ajustam perfeitamente às da biblioteca espectral de referência, tendo em vista a presença de misturas minerais, diferenças na composição geoquímica ou no grau de ordenamento cristalino dos minerais.

Da análise espectral das amostras da área de estudo, puderam ser identificados os seguintes minerais principais: caulinita, ilita (tendendo para fengita ou muscovita), clorita (férica e ferro-magnésiana), hematita e goetita.

Para micas brancas e argilas, os picos das feições de absorção em ~2200 nm (ligação Al-OH) e em ~1910 (água molecular) são críticos para sua identificação. Para cloritas, o pico da feição de absorção em ~2250 nm (ligação Fe-OH) e em ~2350 nm (ligação Mg-OH) e a forma do espectro entre 1400 e 1900 nm têm sido utilizados para identificar o conteúdo de Fe:Mg (Clark *et al.*, 2007; Cohen, 2011).

A caulinita apresenta feições de absorção duplas localizadas entorno de 1400 nm e 2200 nm. A feição dupla em ~1400 nm é função das vibrações nos íons hidroxilas (OH-) e moléculas de água (H<sub>2</sub>O), enquanto a feição dupla em ~2200 nm deve-se à energia vibracional da ligação Al-OH. A presença da feição de absorção em ~1900 nm indica presença de água molecular na amostra. Em amostras com alto conteúdo de sílica ou baixas concentrações de caulinita, a feição da ligação Al-OH pode estar modificada ou decrescer para uma pequena inflexão (Harraden *et al.*, 2013).

A ilita apresenta cinco feições de absorção principais: 1400 nm (vibrações de íons hidroxila OH-), 1900 nm (água molecular), ~2200 nm (diagnóstica da ilita e variável segundo

a sua composição), ~2347 nm e ~2440 nm (diagnósticas da illita e consistentes mesmo em casos de misturas da illita com outros minerais). Foi identificado o predomínio, em termos composicionais, de illita rica em Mg-Fe (tendendo para fengita) e, em poucas amostras, de illita rica em K (tendendo para muscovita), observando-se uma tendência de aumento progressivo do comprimento de onda da feição de absorção principal dos termos ricos em potássio até os enriquecidos em ferro/magnésio.

A paleotemperatura de cristalização da clorita, refletida em sua composição química, mostra particular interesse para os estudos de gênese dos depósitos minerais. A clorita apresenta feições de absorção diagnósticas em 2235-2255 nm e 2320-2360 nm, dependendo da relação Fe/Mg (GMEX, 2008). Nas amostras estudadas foram identificadas cloritas férricas e ferro-magnesianas, em conformidade com Troian (2009). Para este autor, a clorita é o argilomineral mais abundante nas rochas afetadas pela alteração hidrotermal na Mina Uruguai, ocorrendo alterando a matriz da rocha encaixante das mineralizações; como veios/vênulas com illita, sulfetos (pirita e calcopirita) e hematita venular associados; e alterando minerais detríticos, principalmente a biotita. A variação na quantidade de ferro nas cloritas geradas por processos hidrotermais indica a ocorrência de pelo menos dois pulsos no processo de alteração hidrotermal.

Os óxidos de ferro produzem feições de absorção características devido aos processos eletrônicos envolvidos nas ligações do  $Fe^{3+}$  com o oxigênio (hematita) ou com oxigênio e hidroxila (goetita) (Hunt & Ashley, 1979; Cudahy *et al.*, 2008). A goetita e a hematita apresentam feições de absorção características entre 650 e 715 nm e entre 850 e 1000 nm (Morris, 1985).

A paragênese identificada, constituída por caulinita + illita (fengita + muscovita) + clorita (férrica e ferromagnésiana) + hematita + goetita, associada a outras características observadas na Mina Uruguai, é consistente com alteração hidrotermal sob condições epitermais de baixo enxofre, num subtipo apresentado por Sillitoe (1993), como proposto em Laux *et al.* (2005).

Os depósitos epitermais se formam no intervalo de temperaturas de  $<150^{\circ}C$  a  $\sim 300^{\circ}C$ , em condições crustais que vão da superfície até uma profundidade de 1 a 2 km, tendo como características diagnósticas altos conteúdos de Au e Ag, baixa salinidade (frequentemente

<5% equiv. peso de NaCl), evidência de boiling (ebulição) e de água meteórica como a maior fonte dos fluidos mineralizantes (White & Hedenquist, 1995).

Tais depósitos podem ser divididos em dois tipos principais, de acordo com as assembleias minerais características do minério, da ganga e das alterações hidrotermais: alto enxofre (ácido-sulfato ou alunita-caulinita  $\pm$  pirofilita) e baixo enxofre (adulária-sericita  $\pm$  illita é o tipo mais comum) (Hayba *et al.*, 1985; Berger & Heley, 1988). Além da paragênese, os depósitos epitermais de baixo enxofre diferem dos de alta sulfetação por apresentarem uma estrutura de veios melhor definida, menor afinidade magmática, por serem gerados a partir de fluidos com menores temperaturas (100-250°C), salinidades atenuadas (0-3% de NaCl), pH neutro, e em ambiente de deposição redutor (Marcoux, 1995).

Na Mina Uruguai, a alteração hidrotermal ocorre nas proximidades das zonas de fratura e filões, sob a forma de cloritização, silicificação e sericitização, se estendendo a partir dos filões apenas por alguns metros, consistente com o modelo do tipo epitermal, diferentemente do que ocorre, por exemplo, nos depósitos de cobre pórfiro, onde ela é intensa e pervasiva. As temperaturas, entre 187 e 328°C (Lima, 1998; Laux & Lindenmayer, 1998; Ronchi *et al.*, 1998) e as baixas a moderadas salinidades dos fluidos (Beckel, 1990; Bettencourt, 1976), até 14% equiv. peso de NaCl, estimadas nas Minas do Camaquã, também estão de acordo com o modelo epitermal.

## 5. Conclusões

No estudo e definição de um sistema epitermal, a identificação dos principais minerais constituintes e do zoneamento das assembleias de alteração hidrotermal são características distintas fundamentais.

A espectroscopia de reflectância mostrou-se uma ferramenta adequada para a identificação dos minerais de alteração das rochas estudadas, em concordância com estudos geológicos prévios realizados na área de estudo.

A rapidez com que são obtidos os resultados e a característica não destrutiva do método utilizado validam a utilização desta técnica em programas de exploração mineral, especialmente nas fases iniciais, mesmo em áreas com condições fisiográficas pouco favoráveis, de clima úmido, com cobertura vegetal significativa e alteração intempérica.

A paragênese identificada, constituída por caulinita + ilita (fengita + muscovita) + clorita (férica e ferromagnésiana) + hematita + goetita, associada a outras características observadas na Mina Uruguai, é consistente com alteraçã hidrotermal sob condições epitermais de baixo enxofre.

As curvas espectrais obtidas serã incorporadas à biblioteca espectral do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para aplicações futuras na prõpria área de estudo ou em áreas de contexto geológico/metalogenético similares.

As assinaturas minerais identificadas mostram-se consistentes como membros finais de referênciã no mapeamento espectral aplicado a dados do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), em etapa futura, validando o potencial dos dados em investigações geológicas e de exploraçã mineral.

## Referências bibliográficas

- Beckel, J. 1990. *Metalogenia del Cu, Pb y Zn em la Cuenca de Camaquã Durante el Ciclo Orogenico Brasileiro, Rio Grande del Sur (Brasil)*. Salamanca. 275p. Tese de Doutorado, Universidade de Salamanca.
- Berger, B.B. & Heley, R.W. 1988. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the Western United. *Economic Geology*, 6: 405-423.
- Bergmann, M., Hoff, R. & Ducati, J.R. 2008. Espectrorradiometria para validaçã de dados geológicos e de solos como contribuiçã ao estabelecimento de *terroirs* na Metade Sul (RS, Brasil). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, Curitiba. *Anais...* Curitiba, SBG, v.1, p. 599.
- Bergmann, M., Hoff, R. & Ducati, J.R. 2009. Implantaçã da biblioteca espectral de rochas e solos da CPRM: um resgate da memõria espectral da litoteca e apoio a Projetos de Levantamentos Geológicos Básicos (PLGB). In: SIMPÓCIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. *Anais...* Natal, INPE, v.1. p. 1-8.
- Bettencourt, J.S. 1972. *A mina de cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul*. São Paulo, 175p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduaçã em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Bettencourt, J.S. 1976. Mineralogie, inclusions fluides et isotopes stables d'oxigène et de soufre de la mine de culvres de Camaquã - RS, (une étude préliminaire). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. *Anais...* Ouro Preto, SBG, v.2, p. 409-423.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R. & Sutley, S.J. 2007. *USGS digital spectral library splib06a*. (U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231).
- Cohen, J.F. 2011. *Compositional Variations in Hydrothermal White Mica and Chlorite from Wall-Rock Alteration at the Ann-Mason Porphyry Copper Deposit, Nevada*. Corvallis, 111p. Master of Science in Geology, Oregon State University.

- Cudahy, T., Jones, M., Thomas, M., Laukamp, C., Caccetta, M., Hewson R., Rodger A. & Verrall, M. 2008. *Next generation mineral mapping: Queensland airborne HyMap and satellite ASTER surveys 2006–2008*. 161 p. (CSIRO report P2007/364).
- Cudahy, T., Hewson, R., Caccetta, M., Roache, A., Whitbourn, L., Connor, P., Coward, D., Mason, P., Yang, K., Huntington, J. & Quigley, M. 2009. Drill core logging of Plagioclase feldspar composition and other minerals associated with Archean gold mineralization at Kambalda, Western Australia, using a bidirectional thermal infrared reflectance system. *Reviews in Economic Geology*, 16: 223–235.
- Doublier, M.P., Roache, A. & Potel, S. 2010. Short wavelength infrared spectroscopy: a new petrological tool in low- to very low grade pelites. *Geology*, 38: 1031–1034.
- Fambrini, G.L. 2003. *O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) a norte do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil*. São Paulo, 243p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- GMEX. 2008. *The spectral interpretation field manual*, 3.ed. Sidney, AusSpec International Ltd., 189 p
- Gonzalez, M.A. & Teixeira, G. 1980. Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e Jazida Santa Maria - RS. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Balneário Camboriu. *Anais...* Balneário Camboriu, SBG, v.3, p. 1513-1524.
- Harraden, C.L., McNulty, B.A., Gregory, M.J. & Lang, J.R. 2013. Short wave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Iliamna, Alaska. *Economic Geology*, 108: 483–494.
- Hayba, D.O., Bethke, P.M., Heald, P. & Foley, N.K. 1985. Geologic, mineralogical, and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. *Reviews in Economic Geology*, 5: 129-162.
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., Huston, D., Kamprad, J., Merry, N. & Pontual, S. 2001. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, 96: 939–955.
- Herrmann, W., Green, G.R., Barton, M.D. & Davidson, G.J. 2009. Litho geochemical and stable isotopic insights into submarine genesis of pyrophyllite-altered facies at the Boco Prospect, western Tasmania. *Economic Geology*, 104(6): 775.
- Hook S.J., Karlstrom K.E., Miller C.F. & Mccaffrey, K.J.W. 1994. Mapping the Piute Mountains, California, with thermal infrared multispectral scanner (TIMS) images. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* (1978–2012), 99 (B8): 15605–15622.
- Hunt, G. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
- Hunt, G.R. & Ashley, R.P. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7): 1613.
- Jones, S., Herrmann, W. & Gemmill, J.B. 2005. Short wave length infrared spectral characteristics of the HW horizon: implications for exploration in themyra falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 100(2): 273.
- Justo, A.P., Perrotta, M.M., Souza Filho, C.R., Senna, J.A. & Quitete, E.B. 2012. Espectroscopia de reflectância de minerais de pegmatitos e suas encaixantes: primeiros dados do distrito



- pegmatítico Solonópole-Banabuiú. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 46., 2012, Santos, SP. *Anais...* Santos, SP, SBG. 1 CD-ROM. PAP011394.
- Justo, A.P., Bergmann, M. & Perrotta, M.M. 2013. Identificação de Minerais do Grupo das Zeólitas por Espectroscopia de Reflectância visando à Remineralização de Solos para Agricultura. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM*, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. *Anais...* Poços de Caldas, MG, PETROBRAS/EMBRAPA, p. 265-274.
- Lago, S. 2013. Síntese geológica do depósito de Zn-Pb de Santa Maria-RS: Votorantim Metais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA*, 3., 2013, Gramado. *Palestra técnica*. Gramado, UFRGS.
- Laukamp, C., Cudahy, T., Thomas, M., Jones, M., Cleverley, J.S. & Oliver, N.H.S. 2011. Hydrothermal mineral alteration patterns in the Mount Isa Inlier revealed by airborne hyperspectral data, *Australian Journal of Earth Sciences*, 58: 1-20.
- Laux, J.H. 1999. *Caracterização da mineralização cupro-aurífera de uma parte da Mina Uruguai, Caçapava do Sul-RS*. São Leopoldo, RS. 135p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Laux, J.H. & Lindenmayer, Z.G. 1998. Caracterização da mineralização Cu (Au) de um setor da Mina Uruguai, Minas do Camaquã, Brasil: Geotermometria da clorita. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA*, 10., 1998, Buenos Aires. *Actas...* Buenos Aires, SEGEMAR, v. 3, p. 124-129.
- Laux, J.H., Lindenmayer, Z., Teixeira, J. & Bastos Neto, A. 2005. Ore genesis at the Camaquã copper mine, a Neoproterozoic sediment-hosted deposit in Southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 26(1): 71-89.
- Lima, L. de. 1998. *A Mina Uruguai e Jazida Santa Maria, distrito mineiro de Camaquã (RS): um estudo petrológico, geoquímico e geotermométrico*. São Leopoldo, RS. 109p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Marcoux, E. 1995. Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 321(2A): 723-735.
- Morris, R.C. 1985. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic processes, a conceptual model. *In: Wolf, K.H. (ed.), Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits*, Amsterdam, Elsevier, v. 13, p. 73-235.
- Paim, P.S.G., Faccini, U.F., Guimarães Netto, R. & Nowatzki, C.H. 1992. Estratigrafia de seqüências e sistemas deposicionais das bacias do Camaquã e Santa Bárbara, Eo-paleozóico do RS (Brasil). *Correlación Geologica*, 9: 41-45.
- Perrotta, M.M. 2004. Assinatura espectral de intrusões félsicas em imagens ASTER. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 42., 2004, Araxá, MG. *Anais...* Araxá, MG, SBG. 1 CD-ROM.
- Perrotta, M.M., Souza Filho, C.R. & Leite, C.A.S. 2005. Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia, INPE, p. 1855-1862.
- Perrotta, M.M., Justo, A. P., Souza Filho, C. R., Senna, J. A. & Quitete, E. B. 2012. Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil - ensaio de aplicação: rochas metavulcânicas do Supergrupo Espinhaço Oriental, Bahia, PAP01053. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 46., 2012, Santos, SP. *Anais...* Santos, SP, SBG. 1 CD-ROM.

- Perrotta, M.M., Justo, A.P., Souza Filho, C.R., Senna, J.A., Almeida, T.A.S. & Oliveira, S.A.M. 2013. Estudo de assinaturas espectrais de metavulcânicas do Espinhaço Setentrional e sua aplicação no mapeamento mineral em imagem do sensor ASTER: dados da Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, MCT/INPE. p. 3656-3663.
- Perrotta, M.M., Martins, A.A.M., Almeida, R.C., Melo, T.G.G., Oliveira, S.A.M. & Costa, M.A.C. 2014. Dados de Aerolevantamentos por Sensor Hiperespectral: ensaio de classificação mineralógica metavulcânicas do espinhaço setentrional, Bahia, *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 47., 2014, Salvador. *Anais...* Salvador, SBG. 1 CD ROM. PAP016465.
- Ribeiro, M., Bocchi, P.R., Figueiredo Filho, P. M. & Tessari, R.J. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, RS. *Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral*, DNPM, Rio de Janeiro, 232p.
- Ronchi, L.H., Murta, C.R. & Godoy, M.M. 1998. O minério sulfetado no Arenito Inferior da Mina de Cobre Uruguai, RS. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 40., 1998, Belo Horizonte, *Resumos...* Belo Horizonte, SBG. p. 154.
- Sillitoe, R.H. 1993. Epithermal models: Genetic types, geometrical controls and shallow features. *Mineral Deposit Modeling*, 40: 403-417.
- Sonntag, I., Laukamp, C. & Hagemann, S.G. 2012. Low potassium hydrothermal alteration in low sulfidation epithermal systems as detected by IRS and XRD: Na example from the Co-O mine, Eastern Mindanao, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 45: 47-60.
- Sun, Y., Seccombe, P. K., & Yang, K. 2001. Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elurazinc-lead-silver deposit, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 73(1): 11-26.
- Teixeira, G., Gonzales, A.P., Gonzales, M.A. & Licht, O.A.B. 1978a. Contribuição ao estudo de mineralizações cupríferas disseminadas no Distrito Minas do Camaquã. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife, SBG. p. 1644-1654.
- Teixeira, G., Gonzales, A.P., Gonzales, M.A. & Licht, O.A.B. 1978b. Situação das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife, SBG. p. 1893-1905.
- Troian, G. C. 2009. *A cloritização na Mina Uruguai, Minas do Camaquã, RS/Brasil*. Porto Alegre, 87p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- White, N.C. & Hedenquist, J.W. 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, 23(1): 9-13.
- Yang K., Lian C., Huntington J. F., Peng, Q. & Wang, Q. 2005. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China. *Mineralium Deposita*, 40: 324-336.
- Yang, K., Browne, P., Huntington, J. & Walshe, J. 2001. Characterizing the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(1-2): 53-65.



## Pesquisas em Geociências

Volume 42 (1): Páginas 05 -101  
jan. - abril. 2015

### **Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimental**

Páginas 89-101

Raquel B. BINOTTO, Dejanira L. SALDANHA, Aline R.A. DIAS, Mônica M. PERROTA



Binotto et. al. (2015)

*Pesquisas em Geociências*, 42 (1): 89-101, jan./abr. 2015

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

ISSN 1518-2398

E-ISSN 1807-9806

### **Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimental**

Raquel B. BINOTTO<sup>1,2</sup>, Dejanira L. SALDANHA<sup>1</sup>, Aline R.A. DIAS<sup>3</sup>, Mônica M. PERROTA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: raquel.binotto@cprm.gov.br; dejanira.saldanha@ufrgs.br.

<sup>2</sup>Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de Porto Alegre, Ministério de Minas e Energia. Rua Banco da Província, 105, CEP 90840-030, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: raquel.binotto@cprm.gov.br.

<sup>3</sup>Votorantim Metais. Rua Luiz Benezato, 500, Polo Industrial Multivias, CEP 13212-161, Jundiaí, SP, Brasil. E-mail: aline.anjos@vmetais.com.br.

<sup>4</sup>Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Superintendência Regional de São Paulo, Ministério de Minas e Energia. Rua Costa, 55, CEP 01304-010, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: monica.perrota@cprm.gov.br.

Recebido em 01/12/2014. Aceito para publicação em 13/03/2015.

Versão online publicada em 30/04/2015 ([www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br](http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br))

## 6.2. Artigo Científico 2: Aplicação da técnica de mapeamento espectral na Mina Uruguai, Caçapava do Sul/RS, a partir de imagens multiespectrais ASTER

R. B. Binotto<sup>1,2</sup>; D. L. Saldanha<sup>1</sup>; A.R.A. Dias<sup>3</sup>; M. M. Perrotta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil

<sup>2</sup>MME/CPRM - Serviço Geológico do Brasil, raquel.binotto@cprm.gov.br

<sup>3</sup>Votorantin Metais

### Resumo

Dados multiespectrais do sensor ASTER pré-processados (calibração radiométrica e correção atmosférica), na faixa do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (350 a 2500 nm), em conjunto com análises espectrais de amostras de rochas sedimentares eopaleozoicas foram utilizados com vistas ao mapeamento espectral da alteração hidrotermal associada às ocorrências de Cobre na Mina Uruguai (Minas do Camaquã/RS). O algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) foi selecionado para o procedimento. A cao-esmectita (mistura de caulinita e esmectita) foi identificada em grande parte da área de estudo, associada à alteração supergênica. Foram identificadas, também, zonas argilizadas (ilita) e sericitizadas, associadas aos processos hidrotermais descritos para a Mina Uruguai, relacionados a depósitos epitermais de baixo enxofre. O tipo de alteração, com ocorrência restrita a apenas alguns metros a partir dos filões, diferentemente do que ocorre, por exemplo, nos depósitos de cobre pórfiro, onde a alteração hidrotermal é intensa e pervasiva, torna mais complexa sua identificação na cena ASTER. A cobertura vegetal identificada na região também é elemento interferente na aplicação da técnica, a qual deve ser utilizada de forma combinada à espectroscopia de reflectância para resultados mais efetivos em áreas com condições fisiográficas pouco favoráveis (clima úmido, com cobertura vegetal e alteração intempérica).

### Abstract

ASTER multispectral data preprocessed (radiometric calibration and atmospheric correction) in the visible, near infrared and shortwave (350-2500 nm), as well as spectral analyzes of Eopaleozoic sedimentary rock samples, were used to spectral mapping of hydrothermal alteration associated with copper occurrences in Mina Uruguay (Minas Camaquã / RS). The algorithm Spectral Angle Mapper (SAM) was selected for the procedure. The kao-smectite (mixture of kaolinite and smectite) was identified in much of the study area, associated with supergenic process. Also identified areas with illite and sericite, associated with hydrothermal processes described for Mina Uruguay, related to low sulphidation epithermal deposits. The kind of alteration, with occurrence restricted to just a few meters from the veins, unlike what happens, for example, deposits of porphyry copper, where the hydrothermal alteration is intense and pervasive, becomes more complex your recognition in ASTER scene. The vegetation identified in the region is also intervening material on technical application, which must be used in combination with reflectance spectroscopy for more effective results in areas with unfavorable physiographic conditions (humid climate with vegetation and weathering).

**Palavras-chave:** espectroscopia de reflectância, sensoriamento remoto, mapeamento espectral, sensor ASTER

## 1. Introdução

Desde seu lançamento em dezembro de 1999, a bordo da plataforma TERRA, diversas têm sido as aplicações de dados multiespectrais do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) nas áreas de mapeamento geológico e caracterização de zonas mineralizadas. A existência de três bandas na faixa do visível e infravermelho próximo (VNIR), de seis na faixa do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e cinco na faixa do infravermelho termal tornam possível a identificação de assembleias minerais específicas e de diferentes tipos litológicos.

As faixas espectrais do VNIR/SWIR fornecem dados complementares para o mapeamento litológico, marcando feições de absorção dos metais de transição, especialmente ferro e alguns elementos terras raras (ETR), bem como de carbonatos e hidróxidos (Hunt, 1977). Os minerais formadores das rochas, tais como feldspatos e quartzo, não exibem feições de absorção características nas regiões do VNIR/SWIR, mas sim na faixa do infravermelho termal (TIR) (Hunt *et al.*, 1973).

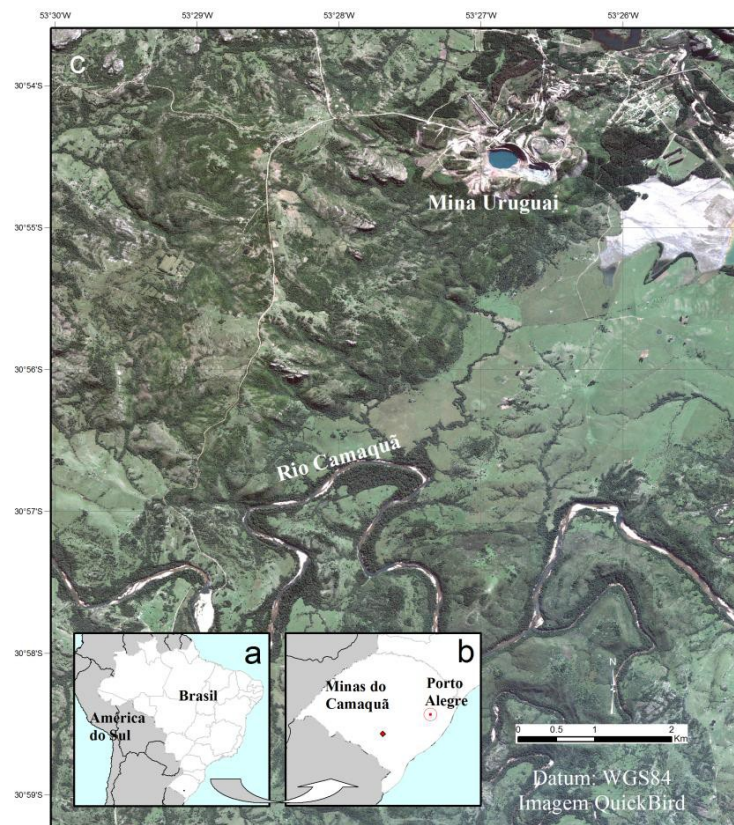
Minerais de alteração hidrotermal com feições espectrais de absorção diagnósticas na faixa do visível e infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) podem ser identificados em imagens multiespectrais sendo bastante utilizadas nas primeiras etapas de campanhas de exploração de depósitos minerais, incluindo os tipos Cu-pórfiro e epitermais de metais preciosos (Souza Filho *et al.*, 2003; Crósta *et al.*, 2003; Ducart, 2004; Lima & Souza Filho, 2004; Perrota *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005; Rowan *et al.*, 2006; Mars & Rowan, 2006, 2010; Di Tommaso & Rubinstein, 2007; Yujun *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Moore *et al.*, 2008; Tangestani *et al.*, 2008; Bedini *et al.*, 2009; Herrmann *et al.*, 2009; Doublier *et al.*, 2010; Gabr *et al.*, 2010; Laukamp *et al.*, 2011; Pour *et al.* 2011a, b).

Pour & Hashim (2012) publicaram uma revisão sobre as características do sensor ASTER, os produtos e as aplicações das mais recentes técnicas de processamento digital de imagem ASTER como uma ferramenta para o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal associadas a depósitos do tipo Cu-pórfiro e epitermais de ouro e rochas hospedeiras. Foi demonstrada a adequação e a crescente utilização, nos últimos anos, dos dados ASTER para a exploração dos tipos de depósitos enfocados, em nível mundial.

No presente artigo é demonstrada a aplicação de técnicas de classificação espectral, utilizando o sensor ASTER, na região das Minas do Camaquã, visando à identificação da alteração hidrotermal associada às ocorrências de cobre na Mina Uruguai, depósito de Cu (Au/Ag) com modelo genético do tipo epitermal de baixo enxofre (Laux *et al.*, 2005, entre outros).

## 2. Área, materiais e métodos

A área de estudo está situada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, na localidade de Minas do Camaquã, a aproximadamente 350 km da capital do estado, Porto Alegre, com acesso final através da BR-153 e estradas vicinais. As coordenadas de referência da Mina Uruguai são 30°54'34" Sul e 53°26'37" Oeste (**Fig. 1**).



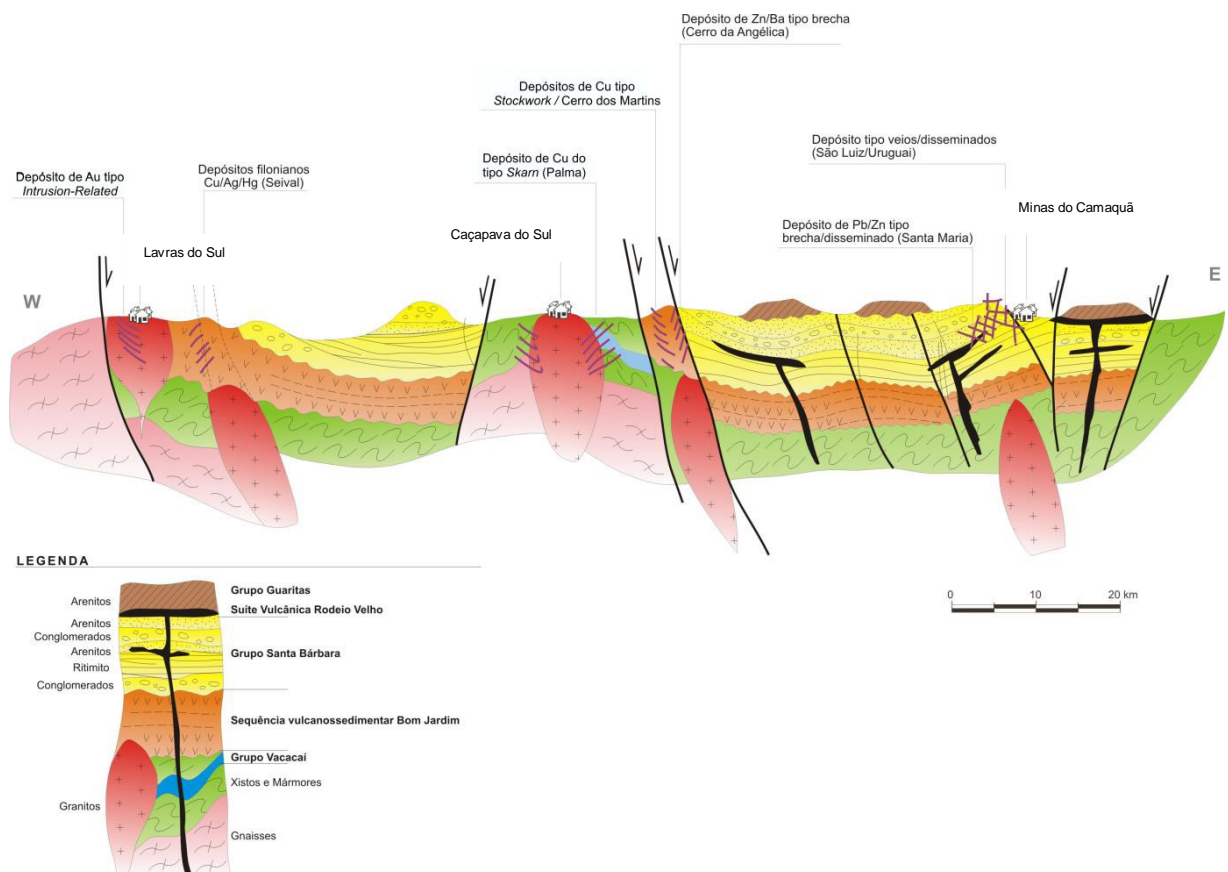
**Fig. 1. Localização da área de estudo: a) Situação no país; b) Situação no estado do Rio Grande do Sul e em relação à capital, Porto Alegre; c) Mina Uruguai, Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil.**



## 2.1. Contexto geológico

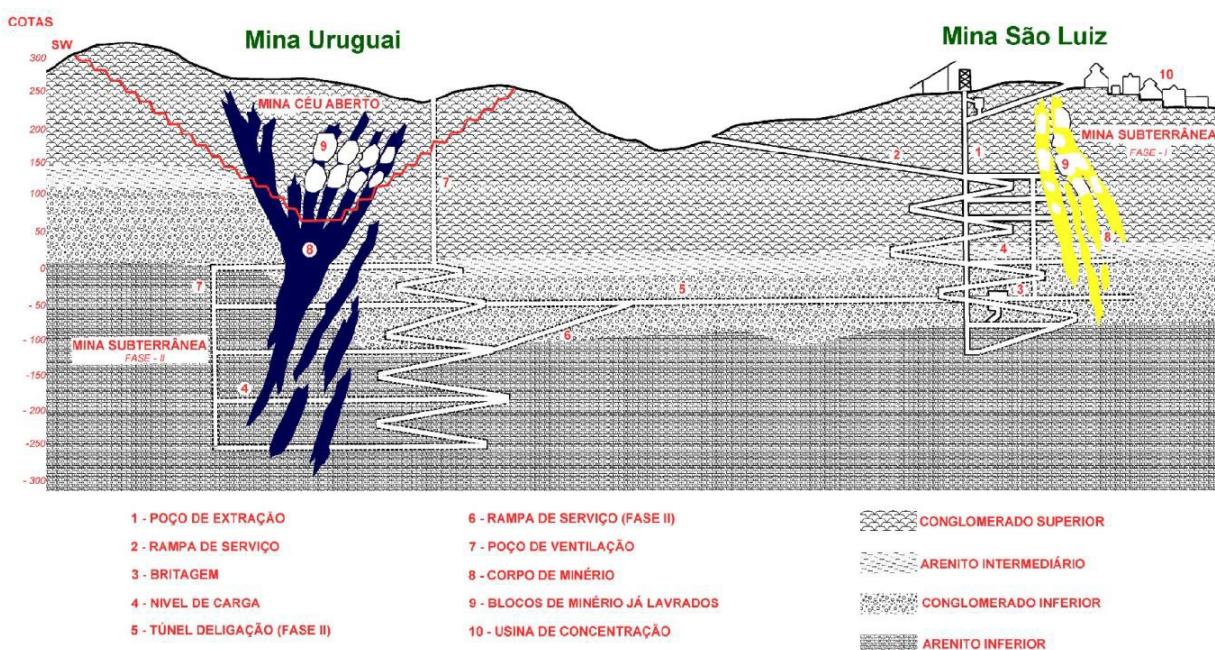
As Minas do Camaquã estão localizadas em um gráben com direção geral nordeste, identificando-se dois sistemas de falhas principais, um regional, com direção nordeste (N20°-30°E), responsável pelos limites e compartimentação longitudinal do gráben, e outro controlando as principais estruturas mineralizadas, noroeste (N50°-70°W) (Ribeiro & Fantinel, 1978).

No contexto geológico regional, as rochas, na região das Minas do Camaquã, inserem-se no Grupo Santa Bárbara (Fambrini, 2003) (**Fig.2**), de idade eopaleozoica, cujas rochas sedimentares classicamente são relacionadas à Formação Arroio dos Nobres por outros autores (e.g., Ribeiro *et al.*, 1966; Gonzalez & Teixeira, 1980; Paim *et al.*, 1992), membros Mangueirão e Vargas, sendo as rochas deste último hospedeiras das mineralizações de Cu-Pb-Zn.



**Fig. 2. Contexto geológico da área de estudo: Mina Uruguai, Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil (retirado de Lago, 2013).**

O Membro Vargas é constituído por um pacote de arenitos e conglomerados, com mergulho em torno de N30°E, tendo sido subdividido, na área das Minas do Camaquã, da base para o topo, em cinco unidades litológicas (**Fig. 3**): Arenito Inferior, Conglomerado Inferior, Arenito Intermediário, Conglomerado Superior e Arenito Superior. Com exceção do Arenito Superior, as demais unidades apresentam mineralizações (Bettencourt, 1972; Teixeira *et al.*, 1978 a, b; Gonzalez & Teixeira, 1980).



**Fig. 3. Arranjo geral das instalações das minas Uruguai e São Luiz, Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil (retirado de Lago, 2013).**

As Minas do Camaquã compreendem dois corpos de minério denominados de Mina Uruguai (minas a céu aberto e subterrânea) e Mina São Luiz (subterrânea) (**Fig. 3**). Conforme descrito nos trabalhos de Teixeira *et al.* (1978 a,b), Laux (1999) e Troian (2009), além de outros, o minério das Minas do Camaquã ocorre sob duas formas: em filões e disseminações. Os filões preenchem falhas, apresentando os sulfetos sob forma maciça ou em massas irregulares no interior de ganga de quartzo, hematita, clorita, calcita e barita. A margem dos veios está marcada por intensa alteração hidrotermal representada por silicificação, cloritização, caulinizacão e sulfetação, ocorrendo quartzo, pirita, calcopirita, bornita, hematita



e Au. Calcita e barita representam a mineralogia tardia, ocorrendo disseminadas e como veios com até 15 cm de espessura nos arenitos e conglomerados. O minério disseminado ocorre nos conglomerados e arenitos, sendo interpretado por diversos autores como parte das zonas de alteração hidrotermal que se desenvolveram no entorno dos veios, representando a manifestação lateral do controle estrutural da mineralização, com os sulfetos ocupando a porosidade secundária da rocha encaixante. Próximo da superfície há uma zona de oxidação, onde o minério contém pequenas quantidades de ouro e prata. A paragênese é simples, constituída principalmente por sulfetos de cobre: calcopirita, bornita e calcosita, além de pirita.

## **2.2. Técnicas e dados utilizados**

### *2.2.1 Campanhas de campo*

Na região de estudo foram efetuadas duas campanhas de campo para reconhecimento geológico e coleta de amostras de rocha, abrangendo a área das Minas do Camaquã e o depósito de testemunhos e atual escritório da Votorantim Metais, onde estão armazenados os testemunhos de sondagem. A relação e características principais das amostras de rocha utilizadas no estudo constam em Binotto *et al.* (2015).

### *2.2.2 Análises espectrais*

As análises espectrais foram realizadas em laboratório, nas dependências da CPRM, em São Paulo, através do espectrorradiômetro ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution com alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 a 2500 nm) e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1400 nm) e 6,5 nm (em 2500 nm) num total de 2101 bandas. A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi efetuada através da utilização do *software The Spectral Geologist (TSG<sup>TM</sup>Pro)*, desenvolvido pela *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)*, comercializado e distribuído pela AusSpec International, ambas australianas.

### *2.2.3 Seleção e pré-processamento da imagem ASTER*

Foi selecionada a imagem AST\_L1B\_003\_09032003134148\_20080223043701 do sensor ASTER nas suas três bandas do visível e infravermelho próximo (VNIR), com resolução espacial de 15 m e seis bandas do infravermelho de ondas curtas (SWIR), com resolução espacial de 30 m. As bandas, de 1 a 9 têm seus comprimentos de onda médios

respectivamente em 0,556; 0,661; 0,807; 1,656; 2,167; 2,209; 2,262; 2,336 e 2,4  $\mu\text{m}$ . As bandas do infravermelho termal (TIR) não foram utilizadas neste estudo. A resolução espacial assumida foi de 15 m, sendo as bandas do SWIR reamostradas para esta resolução.

Após o recorte da imagem para a área de interesse, foi efetuada a calibração radiométrica para conversão para valores de radiância ASTER. Posteriormente, os dados foram transformados em unidades de reflectância aparente através do módulo de correção atmosférica FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) no ENVI™, segundo parâmetros atmosféricos que refletem as condições ambientais locais e da data de passagem do sensor. A correção atmosférica de imagens é necessária para a melhoria de sua qualidade e adequação da resposta espectral dos alvos, uma vez que a atmosfera contém gases e partículas (especialmente vapor de água, O<sub>2</sub>, e CO<sub>2</sub>) que provocam absorção e espalhamento da radiação (Green *et al.*, 1993).

#### 2.2.4 Mapeamento Espectral

A vegetação foi mapeada de forma simplificada através da utilização da razão espectral entre as bandas 3 e 2 da imagem ASTER da área de estudo.

O mapeamento espectral com vistas à identificação dos minerais de alteração hidrotermal foi processado a partir de ferramentas espectrais do programa ENVI™, considerando os espectros medidos em laboratório e aqueles extraídos da cena ASTER. Os espectros de reflectância correspondentes aos minerais identificados em Binotto *et al.* (2015) foram re-amostrados para a resolução espectral do ASTER e utilizados posteriormente na classificação espectral da imagem ASTER. Foi rodado o algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al.*, 1993) que compara o vetor de cada pixel da imagem com os vetores relativos aos espectros de referência, definidos no espaço de “*n*” bandas, classificando-os em algum deles, ou em nenhum, segundo uma diferença máxima angular definida em radianos.

### 3. Resultados

Os resultados da aplicação do mapeamento espectral são apresentados na **Fig. 4**, onde se observa a identificação de cao-esmectita (mistura de caulinita e esmectita) em grande parte da área de estudo. Foram identificados, também, ilita, sericita, esmectita e goetita.

Na **Fig. 5** é apresentado o resultado do mapeamento da vegetação onde são observadas as diferentes classes.

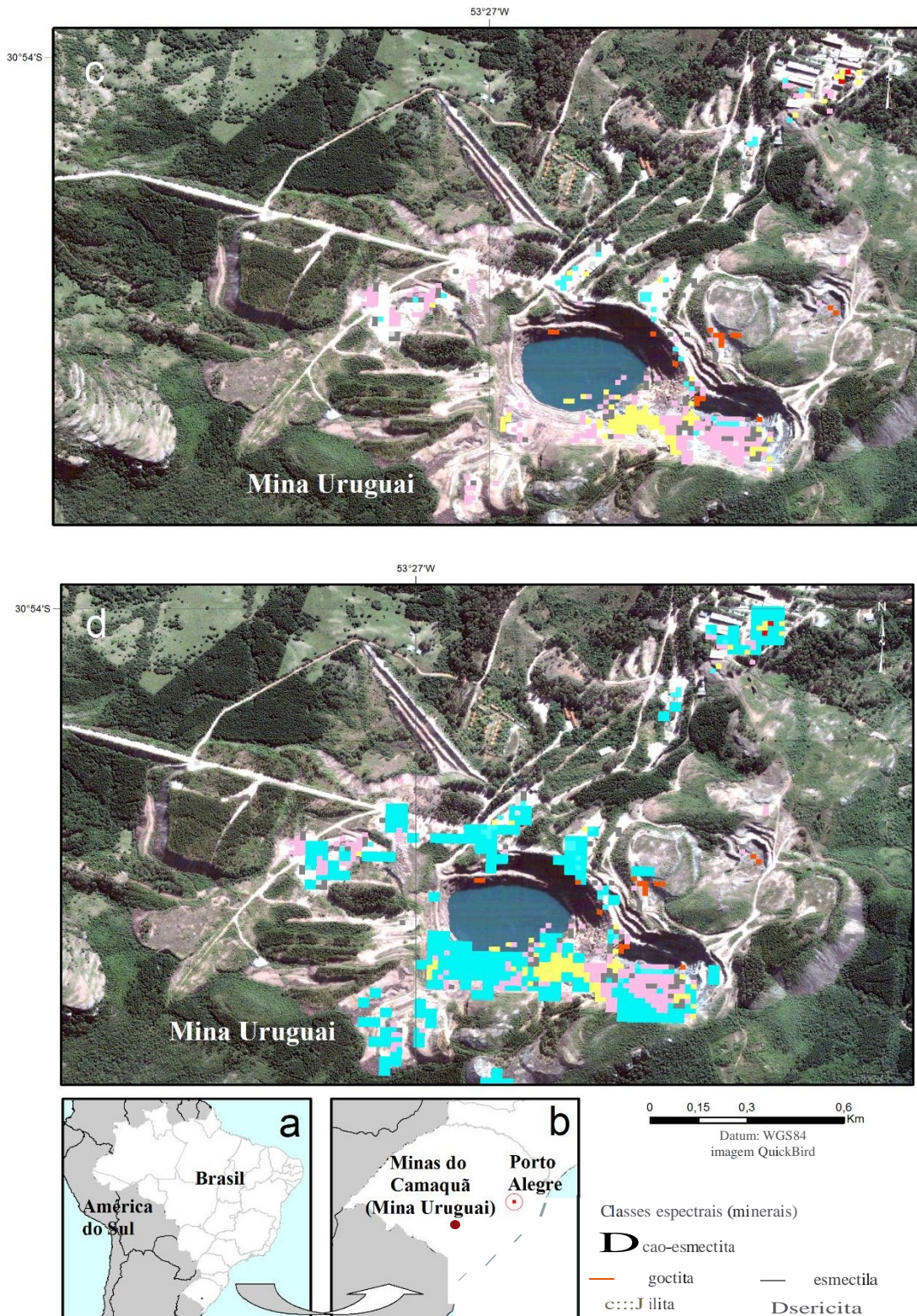


Fig.4. Mapa espectral da área de estudo: A) Situação locacional no país; B) Situação locacional no estado do Rio Grande do Sul e em relação à capital, Porto Alegre; C) e D) Classes espectrais (minerais) identificadas na área de estudo.



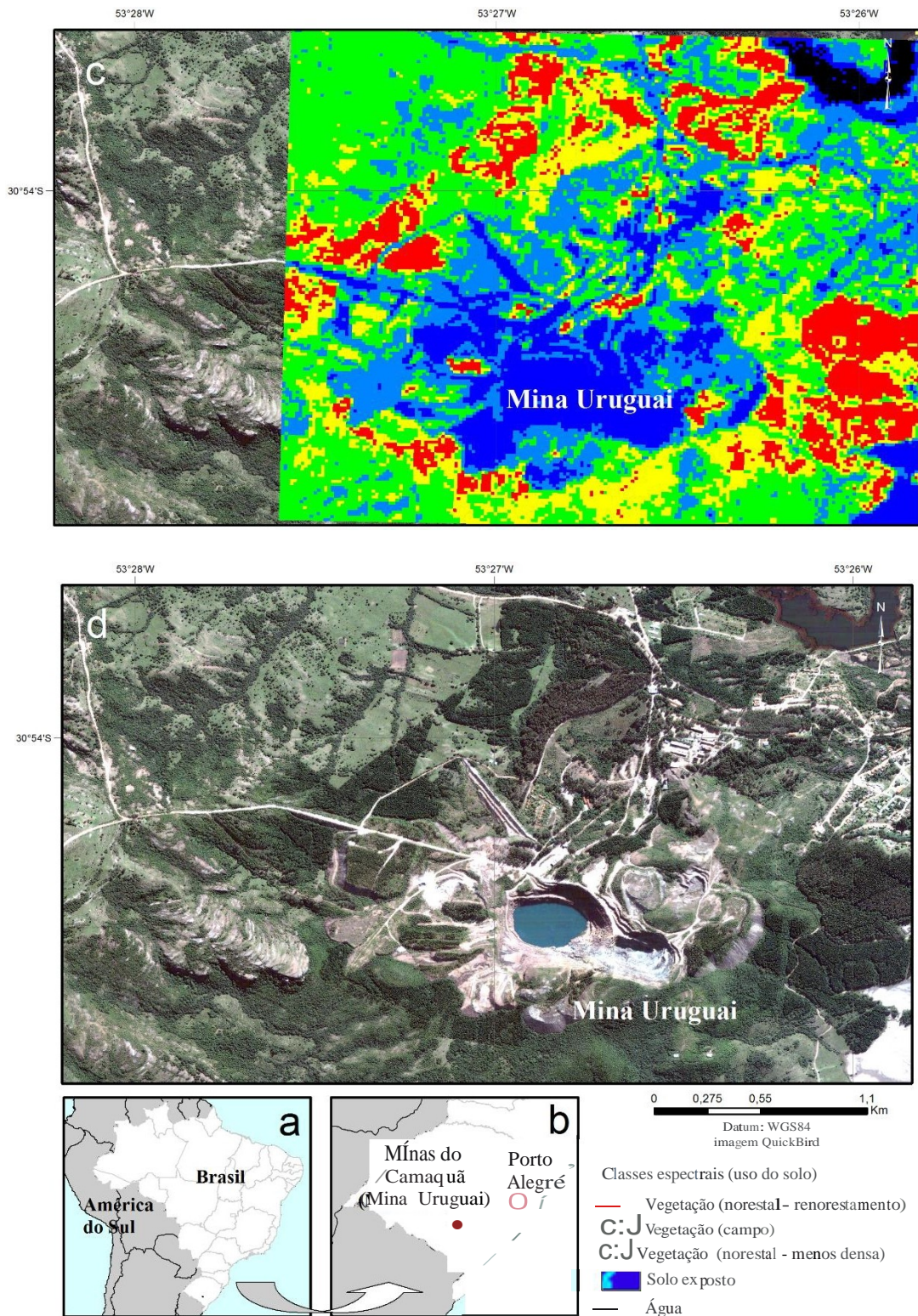


Fig. 5. Mapa da vegetação da área de estudo: A) Situação locacional no país; B) Situação locacional no estado do Rio Grande do Sul e em relação à capital, Porto Alegre; C) Classes espectrais (uso do solo) na área de estudo; D) Cena original de imagem Quickbird da área de estudo.

#### 4. Discussão dos Resultados

Análises espectrais de rochas afetadas em graus variáveis por alteração, seja hidrotermal ou intempérica, resultam em espectros mistos da combinação de diversos minerais. Feições espectrais diagnósticas normalmente são preservadas nestas misturas, o que possibilita a identificação das fases minerais envolvidas.

Conforme acima mencionado, os principais minerais discriminados na área de estudo, a partir do processamento de dados ASTER, foram misturas de caulinita e esmectita (caoesmectita), ilita e sericita. Observam-se também feições espectrais típicas de goetita.

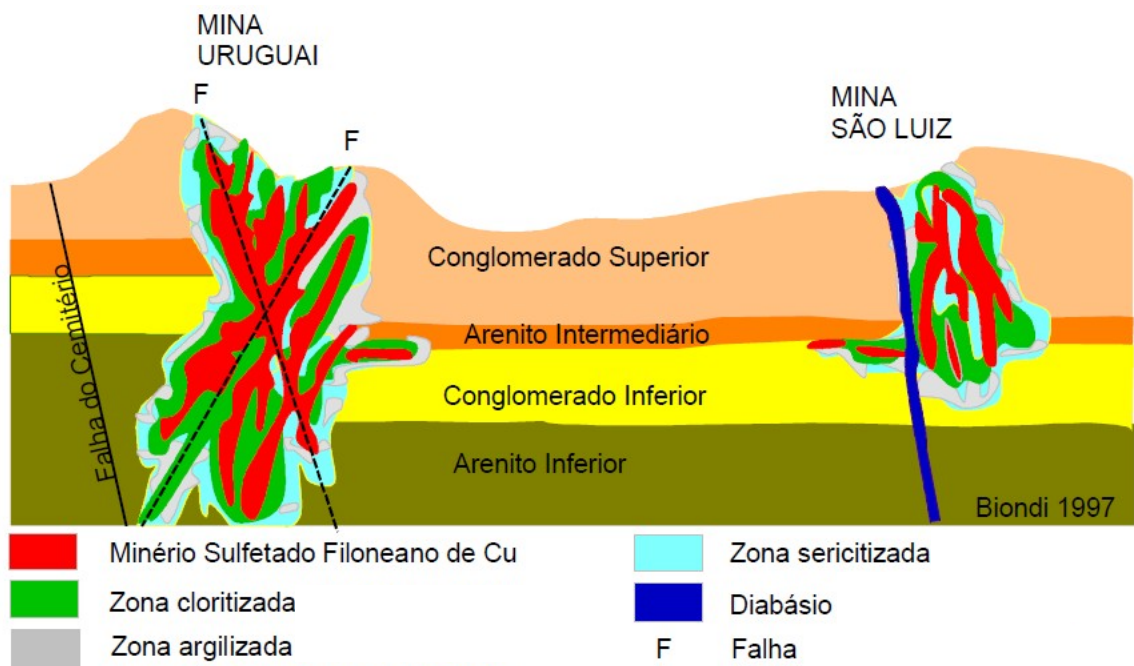
Os métodos de mapeamento espectral usualmente comparam espectros de pixels com espectros de referência. As técnicas para identificação direta de materiais, via extração de feições espectrais específicas, a partir de espectros de reflectância de campo ou laboratório, têm sido utilizadas há algum tempo em aplicações geológicas (Green & Craig, 1985; Kruse *et al.*, 1985; Yamaguchi & Lyon, 1986; Clark *et al.*, 1987; Kruse *et al.*, 1988; Kruse, 1988; Clark *et al.*, 1990, 1991, 1992; Swayze & Clark, 1995).

De forma geral, as técnicas de classificação espectral se baseiam na análise da similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência, ou *endmembers*, e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem.

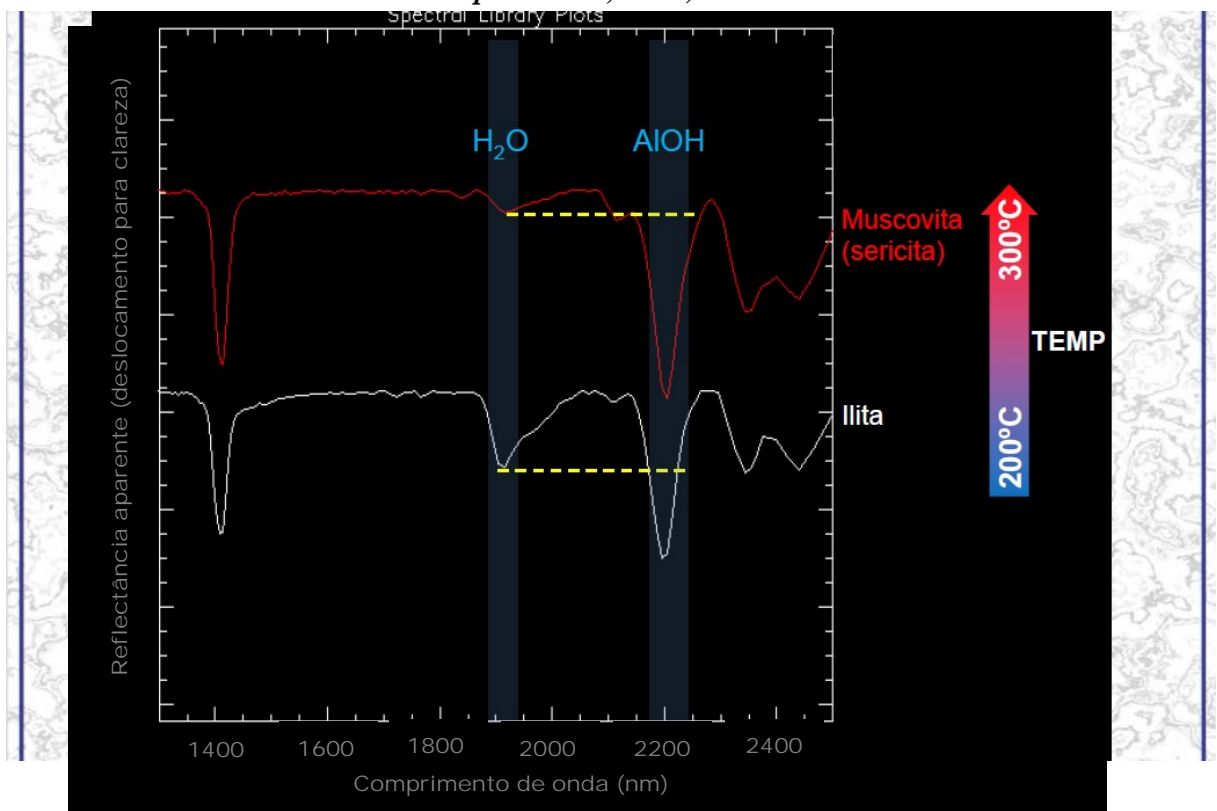
Os resultados obtidos no mapeamento espectral da área de estudo são um reflexo da realidade de campo observada e da tipologia de depósito ora interpretado para a Mina Uruguai.

A identificação e distribuição dos minerais ilita e sericita (**Fig. 4**) é consistente com as zonas argilizada e sericitizada representadas na **Fig. 6**, considerando a cava da Mina Uruguai.

Conforme mencionado em Binotto *et al.* (2005), para micas brancas (sericita) e argilas (ilita), os picos das feições de absorção em ~2200 nm (ligação Al-OH), coincidente com a banda 6 do sensor ASTER, e em ~1910 nm (água molecular), são críticos para sua identificação (**Fig. 7**). A sericita consiste em um filossilicato do grupo das micas com a composição aproximada da muscovita, mas mais hidratada e com cristalinidade menor, muito fina e de tato untuoso, frequentemente associada a reações de alteração de hidrotermalização ou de retrometamorfismo sobre feldspatos potássicos e outros minerais alumossilicosos potássicos por hidratação (Winge *et al.*, 2015).



**Fig. 6. Croqui esquemático dos halos de alteração nas Minas do Camaquã (Biondi, 1997 apud Laux, 1999).**



**Fig. 7. Curvas espectrais – comparação sericita vs illita (Ducart, 2013).**



A illita e a muscovita formam-se a partir de fluidos com pH 4-6 e coexistem com o grupo da caulinita a pH 4-5, dependendo da temperatura e salinidade do fluido. A cristalinidade da illita e muscovita aumenta na medida que aumenta a temperatura de formação, passando desde uma illita 1M desordenada até uma muscovita 2M bem ordenada (Ducart, 2013).

A zona cloritizada não foi identificada nos dados ASTER, tendo sido identificada apenas nos dados de espectroscopia de reflectância de laboratório (Binotto *et al.*, 2015).

A goetita e a hematita apresentam feições de absorção características entre 650 e 715 nm e entre 850 e 1000 nm (Morris, 1985). Na área de estudo, as feições espectrais típicas de goetita identificadas nos dados ASTER parecem estar associadas a porções mais intemperizadas. Feições sugestivas da presença de hematita, não identificadas nos dados ASTER, somente nos dados de reflectância medidos em laboratório (Binotto *et al.*, 2015), ocorrem nas amostras identificadas como afetadas essencialmente por alteração hidrotermal.

A cao-esmectita (mistura de caulinita e esmectita) identificada em grande parte da área de estudo parece estar associada ao componente intempérico posterior (alteração supergênica) e não mais hidrotermal.

As características do tipo de depósito ora interpretado para a Mina Uruguai, epitermal de baixo enxofre, com ocorrência da alteração hidrotermal apenas por alguns metros a partir dos filões, diferentemente do que ocorre, por exemplo, nos depósitos de cobre pórfiro, onde a alteração hidrotermal é intensa e pervasiva, também é consistente com os resultados obtidos.

Cabe ressaltar, ainda, o padrão do uso do solo apresentado na **Fig. 5**, típico da região em estudo, onde as áreas expostas se limitam às intervenções humanas, como estradas e aglomerados urbanos, bem como áreas para exploração mineral, caso da cava da Mina Uruguai, nas quais podem ser utilizados dados orbitais ASTER para reconhecimento de padrões minerais.

## 5. Conclusões

A aplicação, na imagem ASTER, do método de classificação espectral SAM (Spectral Angle Mapper) foi eficiente no mapeamento dos minerais de alteração identificados em campo na região de estudo. Ao contrário de outros métodos como Análise de Principais Componentes, o SAM não depende da estatística da cena na qual é aplicado, utilizando, em

uma mesma análise, todas as porções da assinatura espectral associada ao material alvo. A otimização do método se dá quando é efetuada uma boa correção atmosférica da cena e a conversão para valores de reflectância aparente, o que permite comparar os valores de reflectância de cada pixel da imagem em análise com os espectros de reflectância medidos na superfície.

Apesar do número relativamente reduzido de bandas espectrais disponíveis no sensor ASTER, é possível determinar a presença de minerais de alteração em prospectos, uma vez que na concepção deste sensor foram considerados fatores geológicos na definição das bandas espectrais.

Os resultados obtidos, a exemplo de estudos anteriores, validam as características espectrais e espaciais do sensor ASTER na identificação de feições espectrais significativas para o mapeamento de minerais específicos e de interesse na exploração mineral. A disponibilidade de suas imagens em nível mundial permite que os dados multiespectrais deste sensor sejam utilizados como uma ferramenta eficaz nas atividades de exploração mineral, especialmente na etapa inicial de reconhecimento de prospectos. A cobertura vegetal, entretanto, seja natural ou cultivada, configura-se em fator limitante à aplicação da técnica, devendo ser utilizada de forma combinada à espectroscopia de reflectância para resultados mais efetivos.

## Referências

- Bedini, E., Van Der Meer, F., Van Ruitenbeek, F., 2009. Use of HyMap imaging spectrometer data to map mineralogy in the Rodalquilar caldera, southeast Spain. *Int. J. Remote. Sens.* 30 (2), 327–348.
- Bettencourt, J.S. 1972. *A mina de cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul*. São Paulo, 175p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Binotto, R.B, Saldanha, D.L., Dias, A.R.A., Perrota, M.M. 2015. Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimental. *Pesquisas em Geociências (aceito para publicação)*.
- Clark R.N., King T.V.V., Gorelick N.S. 1987. Automatic Continuum Analysis of Reflectance Spectra: In: *Third Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*, JPL Publication 87-30, *Proceedings*, 138-142.
- Clark, R.N., Swayze G.A., Gallagher A., Gorelick N., Kruse F. 1991. Mapping with Imaging Spectrometer Data Using the Complete Band Shape Least-Squares Algorithm Simultaneously Fit to Multiple Spectral Features from Multiple Materials. In: *Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication 91-28, *Proceedings*, 2-3.



- Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A. 1992. Mapping the Mineralogy and Lithology of anyonlands, Utah with Imaging Spectrometer Data and the Multiple Spectral Feature Mapping Algorithm Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, AVIRIS Workshop. *JPL Publication 92-14*, 1:11-13.
- Clark, R.N.; King, T.V.V.; Klejwa, M.; Swayze, G.A.; Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysics Research*. v. 95, No. B-8, p. 12653-12680, 1990.
- 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):4233–4240.
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol. Rev.* 32, 275–290.
- Doublier, M.P., Roache, A. & Potel, S. 2010. Short wavelength infrared spectroscopy: a new petrological tool in low- to very low grade pelites. *Geology*, 38: 1031–1034.
- 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*. 86 p. (313/2004). Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.
- Ducart, D.F. 2013. *Disciplina: Tópicos de Prospecção I - Espectroscopia de Reflectância aplicada a Exploração Mineral*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. *Material didático*. (inédito).
- Fambrini, G.L. 2003. *O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) a norte do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil*. São Paulo, 243p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T., 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geol. Rev.* 38, 59–69.
- Gonzalez, M.A. & Teixeira, G. 1980. Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e Jazida Santa Maria - RS. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Balneário Camboriu. *Anais...* Balneário Camboriu, SBG, v.3, p. 1513-1524.
- Gonzalez, M.A. & Teixeira, G. 1980. Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e Jazida Santa Maria - RS. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Balneário Camboriu. *Anais...* Balneário Camboriu, SBG, v.3, p. 1513-1524.
- Green A.A. & Craig M.A. 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer data Analysis Workshop, April 8010, *JPL Publication 85-41*: 111-119.
- Green, R.O.; Conel, J.E.; Roberts, D.A. 1993. Estimation of Aerosol Optical Depth, and Additional Atmospheric Parameters for the Calculation of Apparent Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. *In: FOURTH ANNUAL AIRBORNE GEOSCIENCE WORKSHOP*, JPL Public, 1993, 93-26, *Proceedings*, 83-86.
- Herrmann, W., Green, G.R., Barton, M.D. & Davidson, G.J. 2009. Litho geochemical and stable isotopic insights into submarine genesis of pyrophyllite-altered facies at the Boco Prospect, western Tasmania. *Economic Geology*, 104(6): 775.

- Hunt G.R., Salisbury J.W., Lenhoff C.J. 1973. Visible and Near Infrared Spectra of Minerals and Rocks: VI. Additional Silicates. *Modern Geology*, 4: 85-106
- Hunt, G. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3): 501-513.
- Kruse F.A. 1988. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermal altered rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment*, 24:31-51.
- Kruse F.A., Raines G.L., Watson K. 1985. Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 4th, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, *Proceedings*, 309–324.
- Kruse F.A., Calvin W.M., Seznec, O. 1988. Automated extraction of absorption features from Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and Geophysical Environmental Research imaging spectrometer (GERIS) data. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) performance evaluation workshop, JPL Publication 88-38, *Proceedings*, 62-75.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., Goetz, A. F. H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, p. 145–163, 1993.
- Lago, S. 2013. Síntese geológica do depósito de Zn-Pb de Santa Maria-RS: Votorantim Metais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 3., 2013, Gramado. *Palestra técnica*. Gramado, UFRGS.
- Laukamp, C., Cudahy, T., Thomas, M., Jones, M., Cleverley, J.S. & Oliver, N.H.S. 2011. Hydrothermal mineral alteration patterns in the Mount Isa Inlier revealed by airborne hyperspectral data, *Australian Journal of Earth Sciences*, 58: 1-20.
- Laux, J.H. 1999. *Caracterização da mineralização cupro-aurífera de uma parte da Mina Uruguai, Caçapava do Sul-RS*. São Leopoldo, RS. 135p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- Laux, J.H., Lindenmayer, Z., Teixeira, J. & Bastos Neto, A. 2005. Ore genesis at the Camaquã copper mine, a Neoproterozoic sediment-hosted deposit in Southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 26(1): 71-89.
- Lima, V. S. & Souza Filho. 2004. Assinaturas Espectrais de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (Ba): Um Estudo Baseado em Dados do Sensor ASTER. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 42, 2004, Araxá. *Anais...* CD-ROM, 2004.
- Mars, J.C. & Rowan, L.C., 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sens. Environ.* 114, 2011–2025.
- Mars J. C. & Rowan, L.C. 2006. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*. v. 2; no. 3; p. 161-186.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Asady, H., Modabberi, S., 2008. Mapping mineralogical alteration using principal component analysis and matched filter processing in Takab area, north-west Iran, from ASTER data. *Int. J. Remote. Sens.* 29, 2851–2867.

- Paim, P.S.G., Faccini, U.F., Guimarães Netto, R. & Nowatzki, C.H. 1992. Estratigrafia de seqüências e sistemas deposicionais das bacias do Camaquã e Santa Bárbara, Eo-paleozóico do RS (Brasil). *Correlación Geologica*, 9: 41-45.
- Perrotta, M.M., Souza Filho, C.R. & Leite, C.A.S. 2005. Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia, INPE, p. 1855-1862.
- Pour, A.B. & Hashim, M. 2012. Review: The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews* 44 (2012) 1–9.
- Pour, B.A., Hashim, M., 2011a. Spectral transformation of ASTER data and the discrimination of hydrothermal alteration minerals in a semi-arid region, SE Iran. *Int. J. Phys. Sci.* 6 (8), 2037–2059.
- Pour, B.A., Hashim, M., Marghany, M., 2011b. Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. *Int. J. Phys. Sci.* 6 (4), 917–929.
- Ribeiro, M., Bocchi, P.R., Figueiredo Filho, P. M. & Tessari, R.J. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, RS. *Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral*, DNPM, Rio de Janeiro, 232p.
- Ribeiro, M. & Fantinel, L.M. 1978. Associações petrotectônicas do Escudo Sul- Riograndense: I Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. *Iheringia, Série Geológica*, 5: 19-54.
- Rowan L. C, Schmidt R.G., Mars J. C. 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Mars Remote Sensing of Environment* 104, p 74–87.
- 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: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS) 2003 Annual Conference*, 1-12 (CD-ROM).
- Swayze G.A. & Clark R.N. 1995. Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the Tricorder Algorithm. *In: Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, Green R.O. (Ed.), *JPL Publication 95-1:157-158*.
- Tangestani, M.H., Mazhari, N., Ager, B., Moore, F. 2008. Evaluating advance spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran. *Int. J. Remote. Sens.* 29 (10), 2833–2850.
- Teixeira, G., Gonzales, A.P., Gonzales, M.A. & Licht, O.A.B. 1978a. Contribuição ao estudo de mineralizações cupríferas disseminadas no Distrito Minas do Camaquã. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife, SBG. p. 1644–1654.
- Teixeira, G., Gonzales, A.P., Gonzales, M.A. & Licht, O.A.B. 1978b. Situação das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30., 1978, Recife. *Anais...* Recife, SBG. p. 1893–1905.
- Troian, G. C. 2009. *A cloritização na Mina Uruguai, Minas do Camaquã, RS/Brasil*. Porto Alegre, 87p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Yamaguchi Y., Lyon R.J.P. 1986. "Identification of Clay Minerals by Feature Coding of Near-Infrared Spectra,". In: International Symposium on Remote Sensing of the Environment, 627-636.
- Yang K., Lian C., Huntington J. F., Peng, Q. & Wang, Q. 2005. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu–Au deposit, Xinjiang, China. *Mineralium Deposita*, 40: 324-336.
- Yujun, Z., Jianmin, Y., Fojun, Y., 2007. The potentials of multi-spectral remote sensing techniques for mineral prognostication — taking Mongolian Oyu Tolgoi Cu–Au deposit as an example. *Earth Sci. Front.* 14 (5), 63–70.
- Winge, M. et. al. 2015. Glossário Geológico Ilustrado. Disponível na Internet em 26 de abril de 2015 no site <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>
- Zhang X., Pazner M., Duke N., 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *I SPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62 , 271–282.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de Sensoriamento Remoto utilizadas nos estudos geológicos e de prospecção mineral tem evoluído continuamente, desde interpretações de imagens de satélite multiespectrais (com ênfase para os sensores da série Landsat e ASTER) nas regiões do visível a infravermelho de ondas curtas (VNIR-SWIR) para classificações e análises de imagens de satélite hiperespectrais e utilização de espectrorradiômetros portáteis para aplicações em campo e/ou laboratório.

Do ponto de vista laboratorial, técnicas tradicionais de análise modal e química de rocha total usualmente requerem tempo desde a preparação de amostras (seções, tabletes, pastilhas, etc.), passando pela realização de análises específicas (petrografia, MEV, difratometria, etc.), envio de amostras, recebimento e análise dos resultados, sem mencionar os custos envolvidos ao longo do processo. A possibilidade de análise de uma amostra de rocha sem nenhuma preparação, com geração de seu espectro no instante da leitura no espectrorradiômetro, implica em redução de tempo e custos no desenvolvimento de qualquer projeto, especialmente nas etapas iniciais, seja de reconhecimento geológico ou de campanhas para exploração mineral.

Neste contexto, o presente estudo demonstrou, através da utilização de espectrorradiômetro portátil e processamento de imagens ASTER, a aplicação destas técnicas na identificação e mapeamento espectral como ferramenta na exploração e estudo de depósitos minerais, tendo sido alcançados os objetivos inicialmente estabelecidos. Foram identificados caulinita + illita (fengita + muscovita) + clorita (férica e ferromagnésiana) + hematita + goetita, paragênese mineral que, associada a outras características observadas na Mina Uruguai, é consistente com alteração hidrotermal sob condições epitermais de baixo enxofre. Como resultado do mapeamento espectral, foram reconhecidas zonas argilizadas (illita) e sericitizadas. O tipo de alteração, com ocorrência restrita a apenas alguns metros a partir dos filões, diferentemente do que ocorre, por exemplo, nos depósitos de cobre pórfiro, onde a alteração hidrotermal é intensa e pervasiva, torna mais complexa sua identificação na cena ASTER. Apesar do número relativamente reduzido de bandas espectrais disponíveis no sensor ASTER, é possível determinar a presença de minerais de alteração em prospectos, uma vez que na concepção deste sensor foram considerados fatores geológicos na definição das

bandas espectrais. Os resultados obtidos, a exemplo de estudos anteriores, validam as características espectrais e espaciais do sensor ASTER na identificação de feições espectrais significativas para o mapeamento de minerais específicos e de interesse na exploração mineral. A disponibilidade de suas imagens em nível mundial permite que os dados multiespectrais deste sensor sejam utilizados como uma ferramenta eficaz nas atividades de exploração mineral, especialmente na etapa inicial de reconhecimento de prospectos.

O uso combinado de espectrorradiômetros portáteis e imagens de satélite constitui importante ferramenta no campo geológico, especialmente em regiões tropicais, com elevada umidade e, conseqüentemente, propícia ao desenvolvimento de perfis de alteração e à ocupação agrícola do solo. Em áreas expostas ou com vegetação escassa, a análise de cenas do sensor ASTER fornece resultados excelentes na identificação de minerais de alteração hidrotermal, com larga utilização na avaliação de novas áreas para investimentos por empresas do setor mineral.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) tem investido na estruturação e disponibilização de uma biblioteca espectral, contribuindo de forma efetiva para a disseminação do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto em projetos de mapeamento geológico e programas de recursos minerais ora em desenvolvimento no país.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABRAMS, M. J.; BROWN, D. Silver Bell, Arizona, porphyry copper test site report. In: PALEY, R. N. (Ed.) **The Joint NASN–Geosat Test Case Project Final Report**. Tulsa, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, Cap. 4, p. 4–73, 1984.
- ABRAMS, M. J.; BROWN, D.; LEPLEY, L.; SADOWSKI, R. Remote sensing of porphyry copper deposits in Southern Arizona. **Economic Geology**, v.78, p.591–604, 1983.
- ALBINO, G. V.; MARGOLIS, J. Differing styles of adularia-sericite epithermal deposits—contrasts in geologic setting and mineralogy. **Geological Society of America Abstracts with Program**, v. 23, n. 5, p. A230, 1991.
- ALMEIDA, T. L R. de; SILVA FILHO, W. F.; FAMBRINI, G. L.; SAYEG, H. S.; MCREATH, I.; MACHADO, R.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S. Digital processing and geological interpretation of TM LANDSAT images of the areas east of the Camaquã Mine in Rio Grande do Sul State, Southern Brazil. **Bol.IG-USP**, Série Científica, v. 28, p.101 - 118, 1997.
- ASHLEY, R. P. Occurrence model for enargite-gold deposits. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, n. 82-795, p. 144-147, 1982.
- BEANE, R. E.; TITLEY, S. R. Porphyry copper deposits. Part II. Hidrotermal alteration and mineralization. **Economic Geology**, v. 75, p. 235-269, 1981.
- BECKEL, J. **Metalogeniadel Cu, Pb y Zn em la Cuenca de Camaquã Durante el Ciclo Orogenico Brasileiro, Rio Grande del Sur (Brasil)**. 1990. 275f. Tese (Doutorado) - Universidade de Salamanca, Salamanca Espanha, 1990.
- BECKEL, J. Características físico-químicas do fluido hidrotermal, formador das mineralizações de cobre das Minas de Camaquã, RS. In: WORKSHOP SOBRE AS BACIAS MOLÁSSICAS BRASILIANAS, 1., 1992, São Leopoldo. **Boletim de Resumos Expandidos...** São Leopoldo: SBG. p. 6-11.
- BEDINI, E.; VAN DER MEER, F.; VAN RUITENBEEK, F. Use of HyMap imaging spectrometer data to map mineralogy in the Rodalquilar caldera, southeast Spain. **Int. J. Remote. Sens.**, v.30, n.2, p.327–348, 2009.
- BERGER, B. R.; HENLEY, R. W. Advances in understanding ofepithermal gold-silver deposits, with special reference to the western United States. **Economic Geology Monograph**, n.6, p.405–423, 1989.

- BERGER, B.B.; HELEY, R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits, with special reference to the Western United. In: KEAYS, R.R., RAMSAY, W.R.; GROVES, D.I. Eds. ECONOMIC GEOLOGY, Monograph n°6. **The Geology of gold deposits. Perspective in 1988.** p. 405-423, 1988.
- BERGMANN, M.; HOFF, R.; DUCATI, J. R. Espectrorradiometria para validação de dados geológicos e de solos como contribuição ao estabelecimento de terroirs na Metade Sul (RS, Brasil). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, 2008. v.1, p. 599.
- BERGMANN, M.; HOFF, R.; DUCATI, J. R. Implantação da biblioteca espectral de rochas e solos da CPRM: um resgate da memória espectral da litoteca e apoio a Projetos de Levantamentos Geológicos Básicos (PLGB). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. v.1. p. 1-8.
- BETTENCOURT, J. S. **A mina de cobre de Camaquã, Rio Grande do Sul.** 1972. 175f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.
- BETTENCOURT, J. S. Mineralogie, inclusionsfluides et isotopesstables d'oxigène et de soufre de la mine de culvres de Camaquã - RS, (une étudepreliminaire). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. **Anais...** Ouro Preto: SBG, 1976. v.2, p. 409-423.
- BINOTTO, R. B.; SALDANHA, D. L.; DIAS, A .R. A.; PERROTA, M.M. Identificação dos padrões espectrais da alteração hidrotermal da Mina Uruguai, Caçapava do Sul (RS), utilizando espectros de reflectância experimental. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n.1, p. 89-101, jan./abr., 2015.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. **Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop.** Pasadena, California: JPL, 1995. v. 1, p. 23-26.
- BODNAR, R.J.; REYNOLDS, T.J.; KURHN, C.A. Fluid-inclusions systematic in epithermal systems. **Reviews in Economic Geology**, v. 5, p. 73-97, 1985.
- BONHAM JR., H. F. Models for volcanic-hosted epithermal preciousmetal deposits: a review. In: INTERNATIONAL VOLCANOLOGICAL CONGRESS, 1986. **Proceedings...** New Zealand, 1986, p. 13-17.



- BORBA, A. W. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica.** Porto Alegre, 2006. 110f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BROWN, A. C. Sediment-hosted stratiform copper deposits. In: SHEAHAN, P.A. & CHERRY, M.E. Ed. In: **Ore Deposit Models**, Vol. II. Geoscience Canada, Reprint Series 6, p. 99-115, 1993.
- BUCHANAN, L. J. Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest. **Arizona Geological Society Digest, Tucson**, v. 14, p. 237-262, 1981.
- CARRANZA, E. J.; HALL, M. Mineral mapping with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. **Int. J. Remote. Sens.**, v. 23, n.22, p. 4827–4852, 2002.
- CARVALHO, P. F. Reconhecimento geológico no Estado do Rio Grande do Sul. **Boletim Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil**, Rio de Janeiro, n.66, p. 1-72, 1932.
- CLARK, R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In: RENCZ, A. N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**. New York: John Wiley & Sons, 1999. p. 3-58. (Manual of Remote Sensing, v. 3)
- CLARK, R. N.; KING, T. V. V.; GORELICK, N. S. Automatic continuum analysis of reflectance spectra. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP, 3., 1987, Pasadena, California. **Proceedings...** Pasadena, Califórnia : JPL, 1987. p., 138-142. (JPL Publication 87-3)
- CLARK, R. N.; KING, T. V. V.; KLEJWA, M.; SWAYZE, G. A.; VERGO, N. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysics Research**, v. 95, n. B-8, p. 12653-12680, 1990.
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; GALLAGHER, A. Mapping the mineralogy and lithology of anyonlands, Utah with imaging spectrometer data and the multiple spectral feature mapping algorithm. **Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop**. Pasadena, California: JPL, 1992. p. 11-13. (JPL Publication 92-14)
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; GALLAGHER, A.; GORELICK, N.; KRUSE, F. 1991. Mapping with Imaging Spectrometer Data Using the Complete Band Shape Least-Squares

- Algorithm Simultaneously Fit to Multiple Spectral Features from Multiple Materials. In: AIRBORNE VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER WORKSHOP, 3., 1991. **Proceedings...** Pasadena, California: JPL, 1991. p. 2-3. (JPL Publication 91-28)
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; WISE, R.; LIVO, E.; HOEFEN, T.; KOKALY, R.; SUTLEY, S. J. **USGS digital spectral library splib06a**. Denver, Co: USGS, 2007. (U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231).
- COHEN, J. F. **Compositional variations in hydrothermal white mica and chlorite from wall-rock alteration at the ann-mason porphyry copper deposit, Nevada**. 2011. 111f. Dissertação (Mestrado) - Science in Geology, Oregon State University. Corvallis, Oregon, 2011.
- CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; AZEVEDO, F.; BRODIE, C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 21, p. 4233–4240, 2003.
- CUDAHY, T.; HEWSON, R.; CACCETTA, M.; ROACHE, A.; WHITBOURN, L.; CONNOR, P.; COWARD, D.; MASON, P.; YANG, K.; HUNTINGTON, J.; QUIGLEY, M. Drill core logging of plagioclase feldspar composition and other minerals associated with Archean gold mineralization at Kambalda, Western Australia, using a bidirectional thermal infrared reflectance system. **Reviews in Economic Geology**, v.16, p. 223–235, 2009.
- CUDAHY, T.; JONES, M.; THOMAS, M.; LAUKAMP, C.; CACCETTA, M.; HEWSON, R.; RODGER, A.; VERRALL, M. Next generation mineral mapping: Queensland airborne HyMap and satellite ASTER surveys 2006–2008. **Exploration and Mining Open File Report Report**, n. P2007/364, 2008. 161 p.
- DI TOMMASO, I.; RUBINSTEIN, N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. **Ore Geol. Rev.** v. 32, p. 275–290, 2007.
- DOUBLIER, M. P.; ROACHE, A.; POTEL, S. Short wavelength infrared spectroscopy: a new petrological tool in low to very low grade pelites. **Geology**, v. 38, p.1031–1034, 2010.
- DUCART, D. F. **Caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto**

- e espectroscopia de reflectância.** 2004. 1 v. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2004.
- EARTH Remote Sensing Data Analysis Center - ERSDAC. Crosstalk correction software user's guide. s. l., 2003. 21 p.
- FACCINI, U.F.; PAIM, P.S.G; FRAGOSO-CESAR, A.R.S. Análise faciológica das molassas brasileiras na Região das Minas do Camaquã, RS. In: SIMPÓSIO SULBRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG, 1987. v. 1, p. 75-91.
- FAMBRINI, G. L. **O grupo Santa Bárbara (neoproterozóico III) da bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul.** São Paulo, 2003. 264f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L.; PAES DE ALMEIDA, R.; PELOSI, A. P. M. R.; JANIKIAN, L. A Bacia Camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de rifts do Neoproterozóico III – Eopaleozóico no Rio Grande do Sul. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1, 14-16 maio 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG. Núcleo RS; UFRGS; UNISINOS; ABC; CPRM, 2003.
- GABR, S.; GHULAM, A.; KUSKY, T. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. **Ore Geol. Rev.**, v. 38, p.59–69, 2010.
- GILES, D. L.; NELSON, C. E. Epithermal lode gold deposits of the circum-Pacific. In: CIRCUM PACIFIC ENERGY AND MINERAL RESOURCES CONFERENCE, 3., 1982, Honolulu. **Transactions...** Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1982. p. 273-278.
- GUSTAFSON, L. W.; WILLIAMS, N. Sediment-hosted stratiform deposits of copper, lead, and zinc. **Economic Geology**, v. 75, p. 139-178, 1981.
- GMEX. **The spectral interpretation field manual** 3.ed. Sidney: AusSpec International Ltd., 2008. v. 1 189 p
- GOETZ, A. F. H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: a personal view. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p. S5–S16, 2009.
- GONZALEZ, M. A.; TEIXEIRA, G. Considerações sobre a estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas do Camaquã e Jazida Santa Maria - RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Balneário Camboriu. **Anais...** Balneário Camboriu: SBG, 1980. v.3, p. 1513-1524.

- GORCEIX, H. C. Résultat d'une première exploration de La Province du Rio Grande do Sul (Brésil). **Bulletin de la Société Géologique de France**, v. 3, Serv. III, 1875.
- GREEN, A. A.; CRAIG, M. A. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. In: AIRBORNE IMAGING SPECTROMETER DATA ANALYSIS WORKSHOP, 1985, Pasadena, California. **Proceedings...** Pasadena, California: JPL, 1985. p. 111-119. (JPL Publication 85-41)
- GREEN, R. O.; CONEL, J. E.; ROBERTS, D. A. Estimation of aerosol optical depth, and additional atmospheric parameters for the calculation of apparent reflectance from radiance measured by the airborne visible/infrared imaging spectrometer. In: FOURTH ANNUAL AIRBORNE GEOSCIENCE WORKSHOP, 4., 1993. Pasadena, California. **Proceedings...** Pasadena, California: JPL, 1993. p. 83-86. (JPL Publication, 93-26)
- GUPTA, R. P. **Remote Sensing Geology**. 2.ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 655 p.
- HAYNES, D. W. Stratiform copper deposits hosted by low-energy sediments: II. Nature of source rocks and composition of metal-transporting water. **Economic Geology**, v. 81, n. 2, p. 266-280, 1986.
- HARRADEN, C. L.; MCNULTY, B. A.; GREGORY, M. J.; LANG, J. R. Short wave Infrared Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Associated with the Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska. **Economic Geology**, v. 108, p. 483-494, 2013.
- HAYBA, D. O.; BETHKE, P. M.; HEALD, P.; FOLEY, N.K. Geologic, mineralogical, and geochemical characteristics of volcanic-hosted epithermal precious-metal deposits. **Reviews in Economic Geology**, v.5, p.129-162, 1985.
- HEALD, P.; FOLEY, N. K.; HAYBA, D. O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adulariaseticite types. **Economic Geology**, v. 82, p. 1-26, 1987.
- HEDENQUIST, J. W.; ARRIBAS JR., A.; GONZALEZ-URIEN, E. Exploration for epithermal gold deposits. **Reviews in Economic Geology**, v. 13, p. 245-277, 2000.
- HEDENQUIST, J. W. Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin: CIRCUM PACIFIC ENERGY AND MINERAL RESOURCES CONFERENCE, 4., 1986, Singapore. **Transactions...** Singapore: AAPG, 1987. p. 513-524.

- HEDENQUIST, J. W.; IZAWA, E.; ARRIBAS JR., A.; WHITE, N. C. Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. Tsukuba: Society of Resource Geology, 1996. (Society of Resource Geology Special Publication 1) 1 poster and booklet. 17 p.
- HERRMANN, W.; BLAKE, M.; DOYLE, M.; HUSTON, D.; KAMPRAD, J.; MERRY, N.; PONTUAL, S. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. **Economic Geology**, v. 96, p. 939–955, 2001.
- HERRMANN, W.; GREEN, G. R.; BARTON, M. D.; DAVIDSON, G. J. Lithogeochemical and stable isotopic insights into submarine genesis of pyrophyllite-altered facies at the Boco Prospect, western Tasmania. **Economic Geology**, v. 104, n. 6, p. 775, 2009.
- HOOK, S. J.; KARLSTROM, K. E.; MILLER, C. F.; MCCAFFREY, K. J. W. Mapping the Piute Mountains, California, with thermal infrared multispectral scanner (TIMS) images. **Journal of Geophysical Research Solid Earth** v. 99, n. (B8), p. 15605–15622, 1994.
- HUNT G. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, v. 42, n. 3, p. 501-513, 1977.
- HUNT, G. R.; ASHLEY, R. P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. **Economic Geology**, v. 74, p. 1613–1629, 1979.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W. Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks: I Silicate Minerals. **Modern geology**, v. 1, p. 283-300, 1970.
- HUNT, G. R. Electromagnetic Radiation - The communication link in Remote Sensing. In: SIEGAL, B. S.; GILLESPIE A.R. (Eds.) **Remote sensing in geology**. New York: John Wiley & Sons, 1980. p. 5-45.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: vi. Additional silicates. **Modern Geology**, v. 4, p. 85-106, 1973.
- HUNTINGTON, J. F. The role of remote sensing in finding hydrothermal mineral deposits on Earth. *Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?)*. London, Wiley, England, 1996. 1 v.
- JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R. V. P.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; FAMBRINI, G. L. Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área-tipo: litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 4, p. 349-362, 2003.

- JOHN, D. A. Miocene and early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, western USA: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. **Economic Geology**, v. 96, p. 1827–1853, 2001.
- JOHN, D. A.; GARSIDE, L. J.; WALLACE, A. R. Magmatic and tectonic setting of late Cenozoic epithermal gold-silver deposits in northern Nevada, with an emphasis on the Pah Rah and Virginia ranges and the northern Nevada rift. **Geological Society of Nevada, Special Publication**, n. 29, p. 65-158, 1999.
- JONES, S.; HERRMANN, W.; GEMMELL, J. B. Short Wavelength Infrared Spectral Characteristics of the HW Horizon: Implications for Exploration in the Myra Falls Volcanic-Hosted Massive Sulfide Camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. **Economic Geology**, v. 100, no. 2, p. 273, 2005.
- JUSTO, A. P.; BERGMANN, M.; PERROTTA, M. M. Identificação de minerais do grupo das zeólitas por espectroscopia de reflectância visando à remineralização de solos para agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Poços de Caldas, MG, PETROBRAS/EMBRAPA, 2013. p. 265-274.
- JUSTO, A. P.; PERROTTA, M. M.; SOUZA FILHO, C. R.; SENNA, J. A.; QUITETE, E. B. Espectroscopia de reflectância de minerais de pegmatitos e suas encaixantes: primeiros dados do distrito pegmatítico Solonópole-Banabuiú. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, SP. **Anais...** Santos, SP: SBG, 2012. 1 CD-ROM. PAP011394.
- KAZMIERCZAK, T. S. **Mapeamento da Bacia do Camaquã com a utilização de dados geofísicos, geologia e sensoriamento remoto**. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- KRUSE, F. A. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermal altered rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada and California. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 31-51, 1988.
- KRUSE, F. A.; CALVIN, W. M.; SEZNEC, O. Automated extraction of absorption features from Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and Geophysical Environmental Research imaging spectrometer (GERIS) data. In: AIRBORNE VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER (AVIRIS) PERFORMANCE

- EVALUATION WORKSHOP, 1987, Pasadena, California. **Proceedings...** Pasadena, Califórnia : JPL, 1988. p., 62-75. (JPL Publication 88-38)
- KRUSE, F. A.; RAINES, G. L.; WATSON, K. Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 4., 1985, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1985. p. 309–324.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. B.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. 1993. The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.
- KRUSE, F. A.; BOARDMAN, J. W.; HUNTINGTON, J. F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 41,n.6, p.1388–1400, 2003.
- LAGO, S. Síntese geológica do depósito de Zn-Pb de Santa Maria-RS: Votorantim Metais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 3., 2013, Gramado. **Palestra técnica.** Gramado, UFRGS, 2013.
- LAUKAMP, C.; CUDAHY, T.; THOMAS, M.; JONES, M.; CLEVERLEY, J. S.; OLIVER, N. H. S. Hydrothermal mineral alteration patterns in the Mount Isa Inlier revealed by airborne hyperspectral data. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 58, p. 1-20, 2011.
- LAUX, J. H. **Caracterização da mineralização cupro-auríferade uma parte da Mina Uruguai, Caçapava do Sul-RS.** 1999. 135f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS, São Leopoldo, RS, 1999.
- LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z. G. Caracterização da mineralização Cu(Au) de um setor da Mina Uruguai, Minas do Camaquã, Brasil: Geotermometria da clorita. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 10 e CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA ECONÔMICA, 6., 1998, Buenos Aires. **Actas. . .** Buenos Aires, 1998. v.3, p. 124–129, 1998.
- LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z. G. As Minas do Camaquã: um século de evolução de hipóteses genéticas. In: RONCHI, L. H.; LOBATO, A.O.C. (Coord.). **Minas do**

- Camaquã, um estudo multidisciplinar.** São Leopoldo: UNISINOS/ FAPERGS, 2000a, p.133–164.
- LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z. G. Caracterização do minério filoneano de um setor da Mina Uruguai, Minas do Camaquã. In: RONCHI, L. H.; LOBATO, A.O.C. (Coord.). **Minas do Camaquã, um estudo multidisciplinar.** São Leopoldo: UNISINOS/ FAPERGS, 2000b. p.191-210.
- LAUX, J. H.; LINDENMAYER, Z; TEIXEIRA, J; NETO, A. Ore genesis at the Camaquã copper mine, a neoproterozoic sediment-hosted deposit in Southern Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 26, n.1, p. 71-89, 2005.
- LEINZ, V. Problema geológico do Post-Arqueano no Rio Grande do Sul. **Mineração e Metalurgia**, v. 4, n. 22, p. 203-206, 1939.
- LEINZ, V.; ALMEIDA, S. C. Gênese da Jazida de cobre “Camaquam”, município de Caçapava-Rio Grande do Sul. Secretaria dos Negócios de Agricultura, Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Sul. **Boletim da Divisão de Produção Mineral - DPM**, v. 88. p. 1-56, 1941.
- LIMA, L. DE; ALMEIDA, D.; DEL, P. M.; COLLAO, S. La Mina Uruguai, Distrito Minero de Camaquã. Geologia y características químicas de los minerales de alteración y metálicos (RS)-Brasil. In: CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO, 8., 1997. **Actas...** Antofagasta: Universidad Católica del Norte, 1997. v. 2, p. 925–929.
- LIMA, L. de. **A Mina Uruguai e Jazida Santa Maria, distrito mineiro de Camaquã (RS): um estudo petrológico, geoquímico e geotermométrico.** 1998. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 1998.
- LIMA, V. S.; SOUZA FILHO. Assinaturas Espectrais de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (Ba): um estudo baseado em dados do sensor ASTER. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá. **Anais...** Araxá, MG: SBG, 2004. 1 CD ROM.
- LINDGREN, W. **Mineral deposits.** 14. ed. New York: McGraw-Hill, 1913. 930 p.
- LINDGREN, W. A suggestion for the terminology of certain mineral deposits: **Economic Geology**, v. 17, p, 292-294, 1922.
- LOWELL, J. D.; GUILBERT, J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. **Economic Geology**, v. 65, p. 373-408, 1970.



- MARCOUX, E. Gold and volcanoes: epithermal gold deposits, a review. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris**, v. 321, n. 2A, p. 723-735, 1995.
- MARS, J. C.; ROWAN, L.C. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. **Geosphere**, v. 2; n. 3, p.161-186, 2006.
- MARS, J. C.; ROWAN, L. C. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. **Remote Sens. Environ.**, v. 114, p. 2011–2025, 2010.
- McMILLAN, W. J.; PANTELEYEV, A. Porphyry Copper Deposits. **Geoscience Canada Reprint Series**, v. 3, p. 41-50, 1988.
- MOORE, F.; RASTMANESH, F.; ASADY, H.; MODABBERI, S. Mapping mineralogical alteration using principal component analysis and matched filter processing in Takab area, north-west Iran, from ASTER data. **Int. J. Remote. Sens.**, v. 29, p. 2851–2867, 2008.
- MORAES, E. C. de. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2002. 22p.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Viçosa: UFV, 2003. 307p.
- MORRIS, R. C. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic processes, a conceptual model. In: WOLF, K.H. (Ed.) **Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits**. Amsterdam: Elsevier, 1985. v. 13, p.73-235.
- NARDI, L. V. S.; LIMA, E. F. A associação shoshonítica Lavras do Sul, RS. **Rev. Bras. Geoc.**, v. 15, n. 2, p. 139-146, 1985.
- NARDI, L. V. S.; BONIN, B. Post-orogenic and non-orogenic alkaline granite associations: the Saibro intrusive suite, southern Brazil – A case study. **Chemical Geology**, v. 92, n. 1, p. 197-211, 1991.
- OHARA, T. **Análise das características apresentadas em imagens multiespectrais do satélite landsat no mapeamento geológico-estrutural da porção centro-oeste do Escudo Sul-Riograndense**. 1981. 232f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 1981.
- OYARZUN, R. Mineralizaciones epitermales de metales preciosos. In: LUNAR, R. & OYERZUN, R. Eds. **Jazimentos Minerales Tecnicas de Estudio - Tipos, Evolucion**

- Metalogenética – Exploracion.** Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A. Madrid. p. 383-403, 1991.
- PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR., F.; LOPES, R. C. A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M., DE ROS, L.F. (Eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CIGO-UFRGS, 2000, p. 231-274.
- PAIM, P. S. G.; FACCINI, U. F.; GUIMARÃES NETTO, R.; NOWATZKI, C. H. Estratigrafia de seqüências e sistemas deposicionais das bacias do Camaquã e Santa Bárbara, Eo-paleozóico do RS (Brasil). **Correlación Geologica**, v. 9, p. 41-45, 1992.
- PERROTTA, M. M. 2004. Assinatura espectral de intrusões félsicas em imagens ASTER. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá, MG. **Anais...** Araxá, MG, SBG. 1 CD-ROM.
- PERROTTA, M. M.; JUSTO, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; SENNA, J. A.; QUITETE, E. B. 2012. Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil - ensaio de aplicação: rochas metavulcânicas do Supergrupo Espinhaço Oriental, Bahia, PAP01053. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos, SP. **Anais...** Santos, SP, SBG. 1 CD-ROM.
- PERROTTA, M. M.; JUSTO, A. P.; SOUZA FILHO, C. R.; SENNA, J. A.; ALMEIDA, T. A. S.; OLIVEIRA, S. A. M. 2013. Estudo de assinaturas espectrais de metavulcânicas do Espinhaço Setentrional e sua aplicação no mapeamento mineral em imagem do sensor ASTER: dados da Biblioteca Espectral do Serviço Geológico do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, MCT/INPE. p. 3656-3663.
- PERROTTA, M. M.; MARTINS, A. A. M.; ALMEIDA, R. C.; MELO, T. G. G.; OLIVEIRA, S. A. M.; COSTA, M. A. C. 2014. Dados de Aerolevantamentos por Sensor Hiperespectral: ensaio de classificação mineralógica metavulcânicas do espinhaço setentrional, Bahia, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 47., 2014, Salvador. **Anais...** Salvador, SBG. 1 CD ROM. PAP016465.
- PERROTTA, M. M.; SOUZA FILHO, C. R.; LEITE, C. A. S. Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, INPE, 2005. p.1855-1862.

- POUR, A. B.; HASHIM, M. Review: The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. **Ore Geology Reviews**, v. 44, p. 1–9, 2012.
- POUR, A. B.; HASHIM, M. Spectral transformation of ASTER data and the discrimination of hydrothermal alteration minerals in a semi-arid region, SE Iran. **Int. J. Phys. Sci.**, v. 6, n. 8, p. 2037–2059, 2011.
- POUR, A. B.; HASHIM, M.; MARGHANY, M. Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. **Int. J. Phys. Sci.**, v. 6, n. 4, p. 917–929, 2011.
- REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I.; REISCHL, J. L.; DORNELES, N. T. The Camaquã Cu (Au, Ag) and Santa Maria Pb–Zn (Cu, Ag) Mines of Rio Grande do Sul, Southern Brazil—Is their mineralization syngenetic, diagenetic or magmatic hydrothermal? In: SILVA, M. G., MISI, A. (Coord.) **Base metal deposits of Brazil**. 2. ed. Salvador: SBG. Núcleo Bahia, 1999. p. 54–63.
- REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I.; REISCHL, J. L. Distal magmatic–hydrothermal origin for the CamaquãCu(Au–Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu–Ag) deposits, Southern Brazil. **Gondwana Research**, v.3, p.155–174, 2000.
- REMUS, M. V. D.; MCNAUGHTON, N. J.; HARTMANN, L. A., GROVES, D. I. Pb and S isotope signature of sulphides and constraints on timing and sources of Cu (Au) mineralization at the Camaquã and Santa Maria Mines, Caçapava do Sul, southern Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ISOTOPIC GEOLOGY, 9., 1997, Campos do Jordão, SP. **Extended Abstracts**.. Campos do Jordão, SP: CPGEO/IG/USP, 1997. p. 253– 255.
- RIBEIRO, M. **Geologia da Folha de Bom Jardim, Rio Grande do Sul, Brasil**. Rio de Janeiro: DGM/DNPM, 1970. 142 p. (Boletim, 247).
- RIBEIRO, M. J. **Mapa previsual do cobre no Escudo sul-rio-grandense**: Nota Explicativa. Brasília: DNPM, 1978. 104p. il. (Geologia, 3 – Seção Geologia Econômica, 1).
- RIBEIRO, M.; FANTINEL, L.M. Associações petrotectônicas do Escudo Sul-Riograndense: I Tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. **Iheringia**, Série Geológica, v. 5, p. 19-54, 1978.

- RIBEIRO, M. J.; BADI, W. S. E.; GONZALEZ, A. P.; GONZALEZ, M. A.; LICHT, O. A. B.; TEIXEIRA, G. 1980. Jazida Santa Maria, chumbo e zinco estratiformes no Grupo Bom Jardim, Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Balneário Camboriú. **Anais..** Balneário Camboriú: SBG,1980. v. 3., p. 1725-1742.
- RIBEIRO, M.; BOCCHI, P. R.; FIGUEIREDO FILHO, P. M.; TESSARI, R. I. **Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, 1966. 232 p. (Boletim, 127).
- RIBEIRO, M. J. **Sulfetos em sedimentos detríticos cambrianos do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2 v. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- ROEDDER, E. 1984. Ore deposition environments. **Reviews in Mineralogy**, v. 12, p. 413-472, 1984.
- RONCHI, L. H.; LINDENMAYER, Z. G.; BASTOS NETO, A.; MURTA, C.R. O stockwork e a zona do minério sulfetado no arenito inferior da Mina Uruguai, RS. In: RONCHI, L. H.; LOBATO, A. O. C. (Org.). **Minas do Camaquã: um estudo multidisciplinar**. São Leopoldo: UNISINOS, 2000. p. 165–190.
- RONCHI, L. H.; MURTA, C. R.; GODOY, M. M. O minério sulfetado no arenito inferior da mina de cobre Uruguai, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. *Resumos...* Belo Horizonte: SBG, 1998. p. 154.
- ROWAN, L. C.; SCHMIDT, R. G.; MARS, J. C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. **Mars Remote Sensing of Environment**, v.104, p. 74–87, 2006.
- SARTORI, P. L. P.; KAWASHITA, K. Petrologia e geocronologia do Batólito Granítico de Caçapava do Sul, RS. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2., 1985, Florianópolis. **Atas...** Florianópolis: SBG, 1985. p. 102-115.
- SAWKINS, F. J. **Metal Deposits in Relations to Plate Tectonics**. Second Edition. Springer-Verlag. p. 17-70, 1990.
- SILLITOE, R. H.; HEDENQUIST, J. W. Linkages between volcano tectonic settings, ore-fluid compositions and epithermal precious metal deposits. In: SIMMONS, S. F.; GRAHAM, I. (Ed.) *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids; rulers and witnesses of processes within the Earth*. Littleton, Colo: Society of Economic Geologists, 2003. p. 315–343. (Special Publication 10)

- SILLITOE, R. H. Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: a review. **Geological Society of London Special Publication**, n. 7, p. 99-116, 1977.
- SILLITOE, R. H. Gold deposits in western Pacific island arcs: the magmatic connection. **Economic Geology Monograph**, v. 6, p. 274–291, 1989.
- SILLITOE, R. H. Epithermal models: Genetic types, geometrical controls and shallow features. **Mineral Deposit Modeling**, v. 40, p. 403-417, 1993.
- SILLITOE, R. H. Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralization in the porphyry and epithermal environments. In: WEBER, G. (Ed.) PACRIM'99 CONGRESS, 1999. **Proceedings...** Bali, Indonesia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1999. p. 29-44.
- SOLIANI JR., E. **Os Dados Geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas Implicações de Ordem Geotectônica**. São Paulo, 1986. 425f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- SONNTAG, I.; LAUKAMP, C.; HAGEMANN, S. G. Low potassium hydrothermal alteration in low sulfidation epithermal systems as detected by IRS and XRD: An example from the Co–O mine, Eastern Mindanao, Philippines. **Ore Geology Reviews**, v. 45, p. 47–60, 2012.
- SOUZA FILHO, C. R.; TAPIA CALLE, C. H.; CRÓSTA, A. P.; XAVIER, R. P. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. In: AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING ANNUAL CONFERENCE, 2003, Anchorage, AK.. **Proceedings...** Bethesda, Maryland: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. 1 CD-ROM.
- SPATZ, D. M.; WILSON, R. T. Remote sensing characteristics of porphyry copper systems, western America Cordillera. **Arizona Geological Society Digest**, v. 20, p. 94–108, 1995.
- SUN, Y.; SECCOMBE, P. K.; YANG, K. Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elurazinc-lead-silver deposit, NSW, Australia. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 73, n. 1, p. 11-26, 2001.
- SWAYZE, G. A.; CLARK, R.N. Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the Tricorder Algorithm. In: Green R.O. (Ed.). **Summaries of the Fifth Annual JPL**

- Airborne Earth Science Workshop.** Pasadena, California: JPL, 1995. p. 157-158. (JPL Publication 95-1)
- TANGESTANI, M. H.; MAZHARI, N.; AGER, B.; MOORE, F. Evaluating advance spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran. **Int. J. Remote. Sens.**, v. 29, n.10, p. 2833–2850, 2008.
- TANGESTANI, M. H.; MOORE, F. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran. **Int. J. Remote. Sens.**, v. 23, n. 22, p. 4815–4825, 2002.
- TEIXEIRA, G.; GONZALEZ, A. P. Minas do Camaquã, Município de Caçapava do Sul, RS. In: **Principais depósitos minerais do Brasil:** metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio. Brasília: DNPM CVRD, 1988. v. 3, p. 33-41.
- TEIXEIRA, G.; GONZALES, A. P.; GONZALES, M. A.; LICHT, O. A. B. Contribuição ao estudo de mineralizações cupríferas disseminadas no Distrito Minas do Camaquã. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978a. v. 4, p.1644–1654.
- TEIXEIRA, G.; GONZALES, A. P.; GONZALES, M. A.; LICHT, O. A. B. Situação das Minas do Camaquã, Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978b. v. 4, pp. 1893– 1905.
- TITLEY, S. R; BEANE, R. E. Porphyry copper deposits. Part I. Geological, settings, petrology, and tectogenesis. **Economic Geology**, v. 75, p. 214-235, 1981.
- TROIAN, G. C. **A cloritização na Mina Uruguai, Minas do Camaquã, RS, Brasil.** 2009. 87f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- VAN DER WIELEN, S. E.; OLIVER, S.; KALINOWSKI, A. A.; CREASY, J. 2005. Remotely sensed imaging of hydrothermal footprints in Western Succession, Mount Isa Inlier. In: GIBSON, G. M.; HITCHMAN P. (Ed.). Pmd CRC II Project Final Report - 3D Basin Architecture and Minerals Systems in the Mt Isa Western Succession. s. l.: s. n., 2005. Unpublished report, 268.
- VEIGEL, R. **Evolução diagenética e mineralização Cu-Pb-Zn dos “red-beds” do distrito de Camaquã - RS.** 1989. 185f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 1989. 185 pp.

- VEIGEL, R.; DARDENE, M. A. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas da evolução da mineralização de Cu-Pb-Zn do Distrito de Camaquã, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 20, n. 1-4, p. 55-67, 1990.
- WHITE, N. C.; HEDENQUIST, J.W. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. **SEG Newsletter**, v. 23, n.1, p. 9-13, 1985.
- WILDNER, W.; RAMGRAB, G. E.; LOPES, R.C.; IGLESIAS, C. M. F. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul: sistema de informações geográficas – SIG: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2008. Escala 1:750.000. 1 DVD. Mapas Geológicos Estaduais; Programa Geologia do Brasil - PGB.
- YAMAGUCHI Y.; LYON R. J. P. Identification of Clay Minerals by Feature Coding of Near-Infrared Spectra,". In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF THE ENVIRONMENT, 20., 1986, Nairobi, Kenya. **Proceedings...** Nairobi, Kenya, 1986. p. 627-636.
- YANG, K.; LIAN, C.; HUNTINGTON, J. F.; PENG, Q.; WANG, Q. Infrared spectral reflectance characterisation of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu–Au deposit, Xinjiang, China. **Mineralium Deposita**, v. 40, p. 324–336, 2005.
- YANG, K.; BROWNE, P.; HUNTINGTON, J.; WALSHE, J. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 106, n.1-2, p. 53-65, 2001.
- YUJUN, Z.; JIANMIN, Y.; FOJUN, Y. The potentials of multi-spectral remote sensing techniques for mineral prognostication — taking Mongolian OyuTolgoi Cu–Au deposit as an example. **Earth Sci. Front.**, v. 14, n. 5, p. 63–70, 2007.
- ZHANG, X.; PANZER, M.; DUKE, N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). **J. Photogramm. Remote Sens.**, v. 62, p. 271–282, 2007.

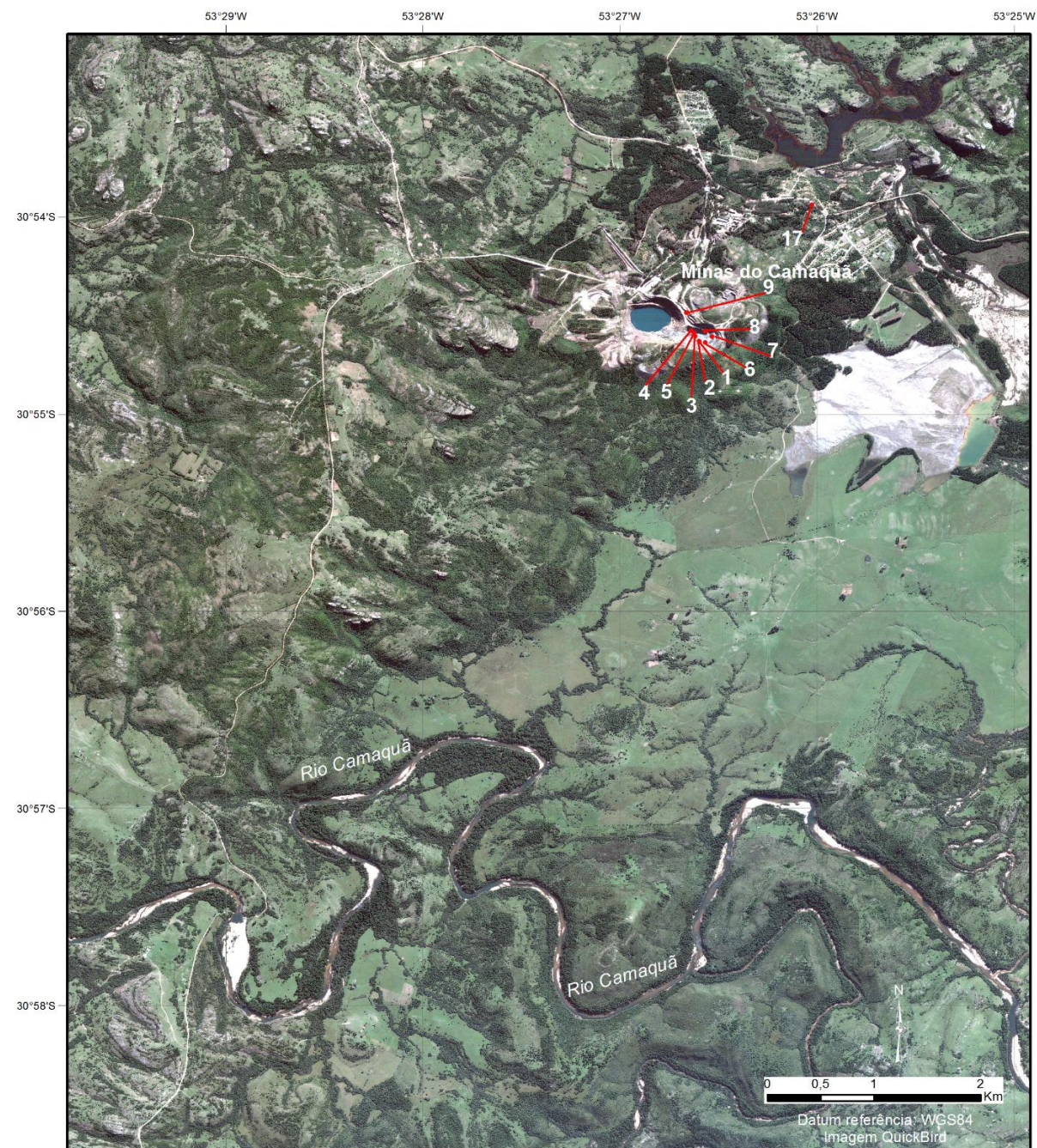
## **ANEXOS**

Anexo A: Amostras de Rocha – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância

Anexo B: Amostras de Testemunhos – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância



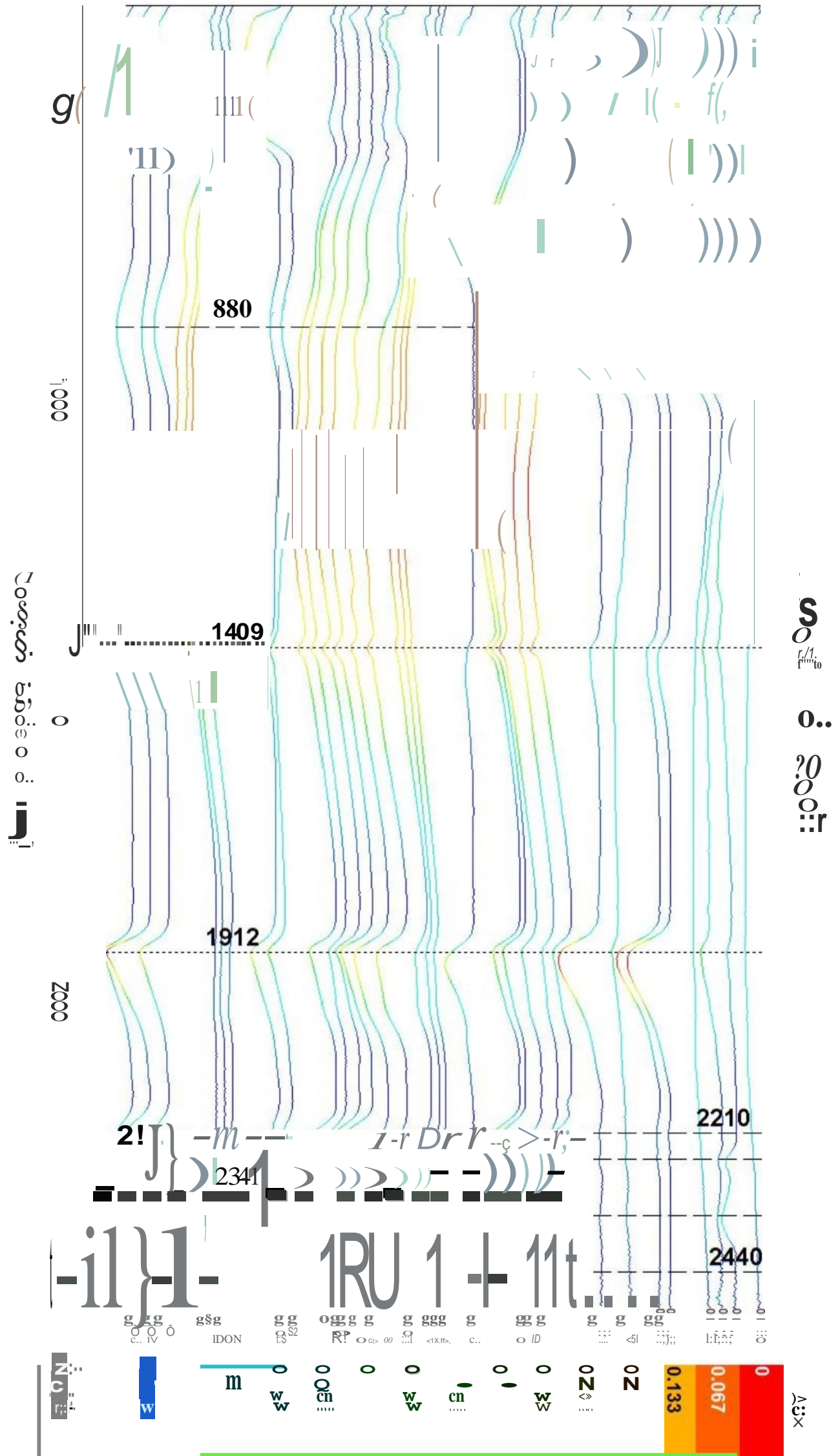
**Anexo A: Amostras de Rocha – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância**



| N  | Amostra CPRM  | Cod TSG          | Rocha                  | Alteração  |
|----|---------------|------------------|------------------------|--|
| 1  | 2760-RB-R-001 | 000061 a 000063  | Arenito                | halo de alteração com veios de hematita e barita |
| 2  | 2760-RB-R-002 | 000064 a 000067  | Arenito                | halo de alteração com veios de barita            |
| 3  | 2760-RB-R-003 | 000068 a 000070  | Conglomerado           | halo de alteração com clorita                    |
| 4  | 2760-RB-R-004 | 000071 a 000072  | Arenito                | halo de alteração com sericita. ilita?           |
| 5  | 2760-RB-R-005 | 000073 a 000075  | Arenito conglomerático | halo de alteração com clorita/oxidação           |
| 6  | 2760-RB-R-006 | 000076 a 000077  | Arenito conglomerático | halo de alteração com clorita                    |
| 7  | 2760-RB-R-007 | 000078 a 000079  | Conglomerado           | halo de alteração com clorita                    |
| 8  | 2760-RB-R-008 | 000080 a 000082  | Conglomerado           | halo de alteração com clorita                    |
| 9  | 2760-RB-R-009 | 000083 a 000084  | Conglomerado           | conglomerado superior                            |
| 17 | 2760-RB-R-017 | 0000101 a 000103 | Conglomerado           | arenito/conglomerado externo à área da mina      |



Reflectância (dados normalizados e re-escalonados)

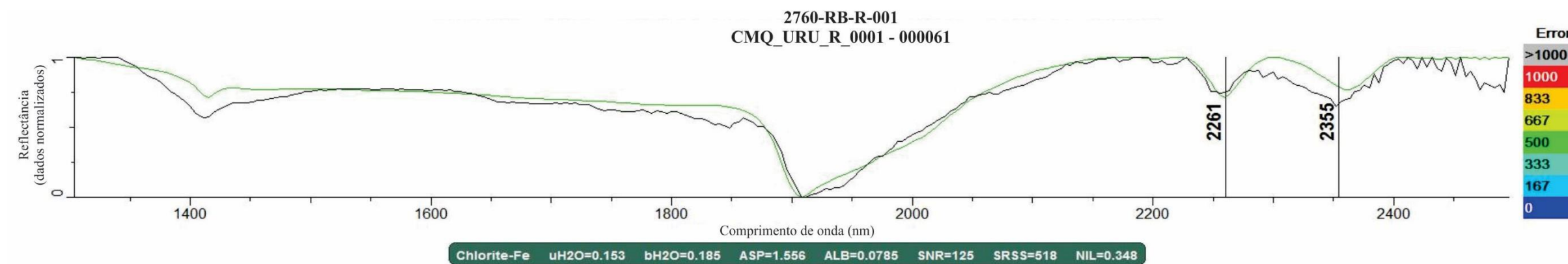
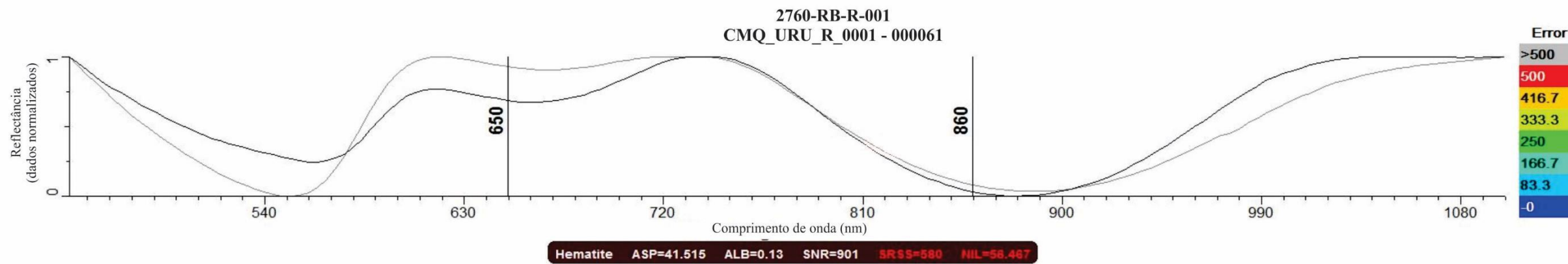
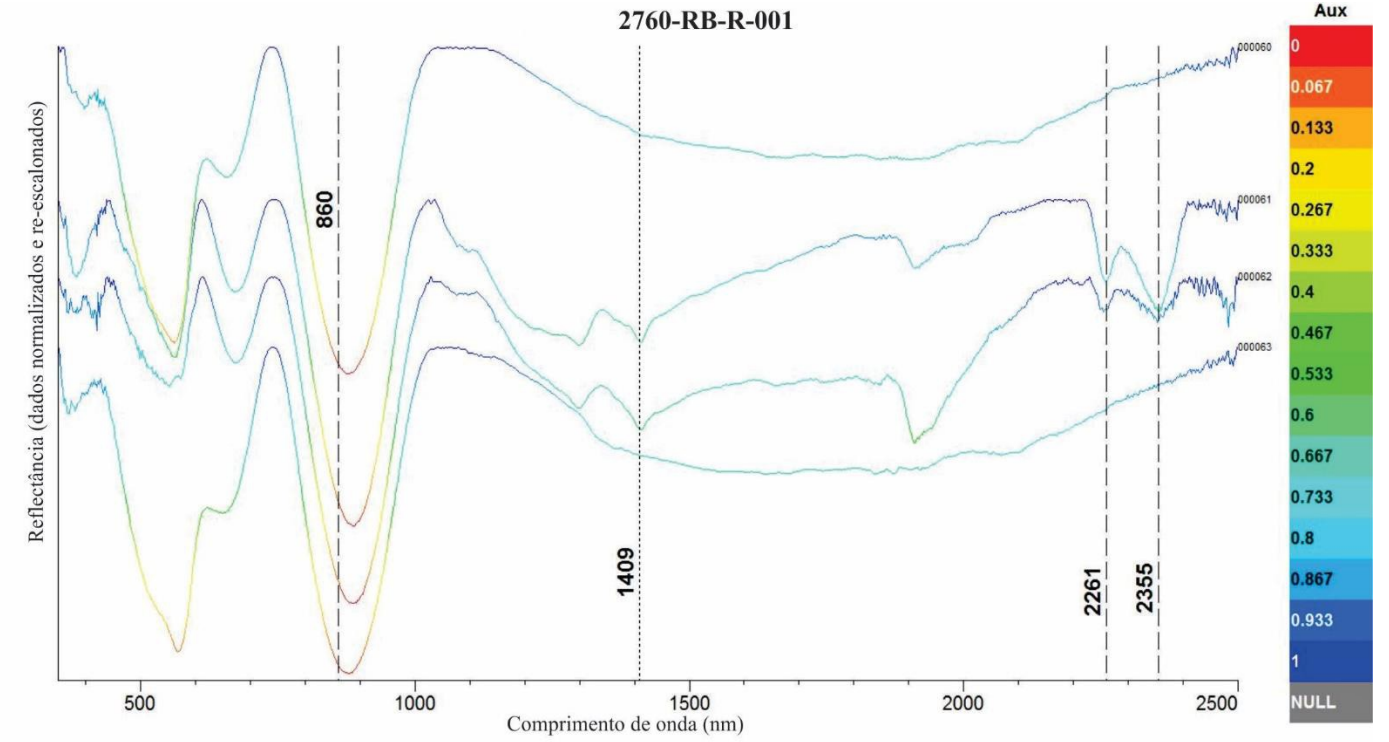


Espectros (reflectância)  
Amostras de rocha  
Minas do Camaquã





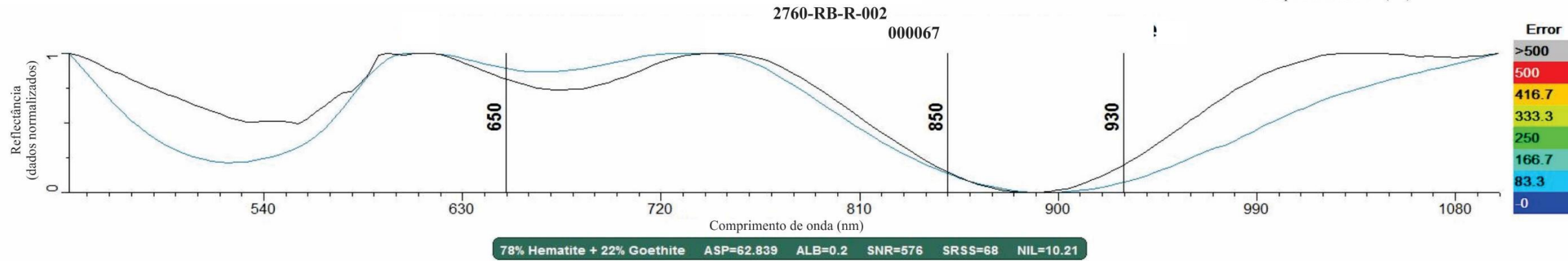
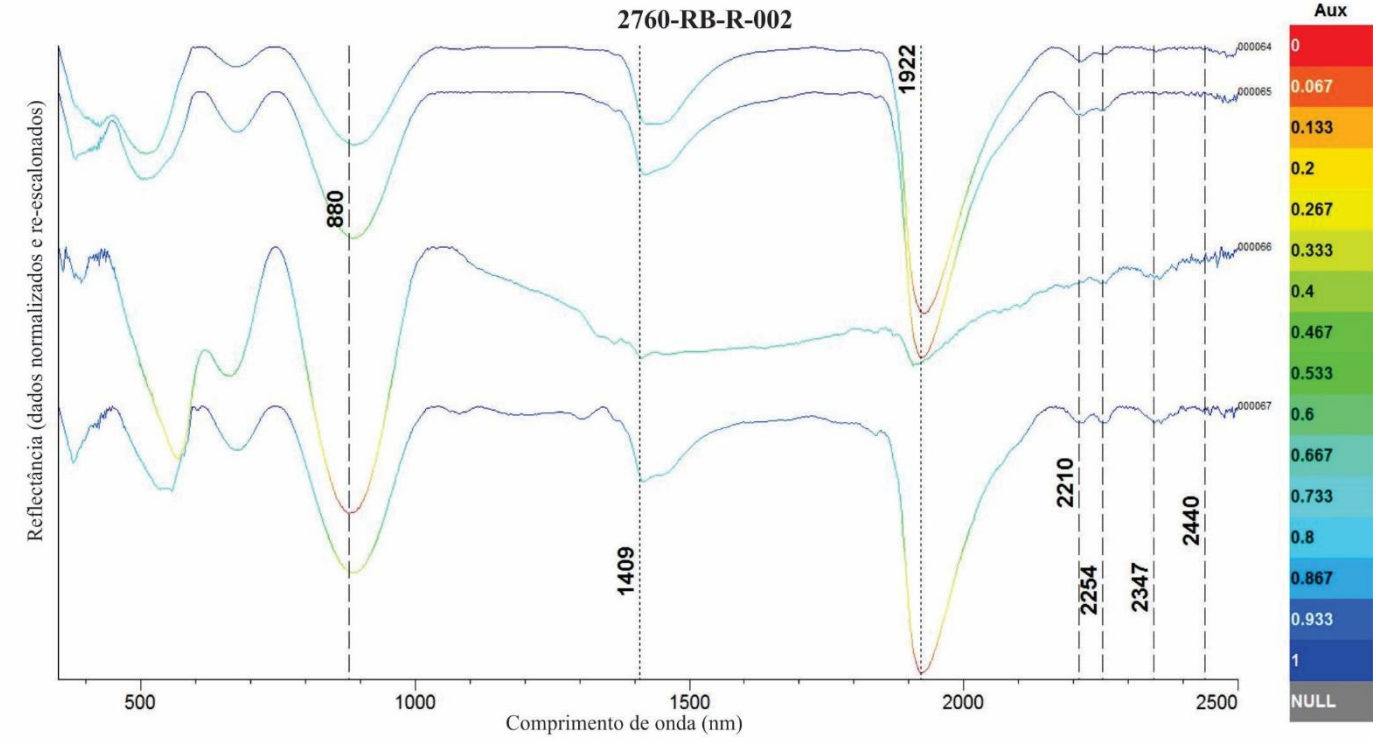
|                                    |  |                            |                |                |
|------------------------------------|--|----------------------------|----------------|----------------|
| Amostra CPRM                       | 2760-RB-R-001  |                            |                |                |
| Latitude                           | -30,91057500   |                            |                |                |
| Longitude                          | -53,44324100   |                            |                |                |
| Rocha                              | Arenito  |                            |                |                |
| Descrição                          | Rocha de coloração marrom-avermelhada, de granulação variando de areia muito fina a fina, maciça, cortada por raros veios milimétricos (~1mm) de coloração branca (calcita?). Também ocorrem concreções de forma circular de hematita/clorita. |                            |                |                |
| Alteração                          | Halo de alteração com veios de hematita e barita   |                            |                |                |
| Cod FieldSpec                      | CMQ_URU_R_0001   | CMQ_URU_R_0002             | CMQ_URU_R_0003 | CMQ_URU_R_0004 |
| Cod TSG                            | 000060   | 000061                     | 000062         | 000063         |
| Face                               | Quebra natural   | Quebra natural             | Quebra natural | Quebra natural |
| Cor                                | Roxo   | Verde                      | Verde claro    | Roxo           |
| Relação Cristais-Fragmentos-Matriz | Matriz+Fragmentos  | Fragmento                  | Fragmento      | Matriz         |
| TSG                                | Hematita   | Chl Fe + Serpentina+ Hemat | Chl Fe + Hemat | Hematita       |



Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-001  
Minas do Camaquã



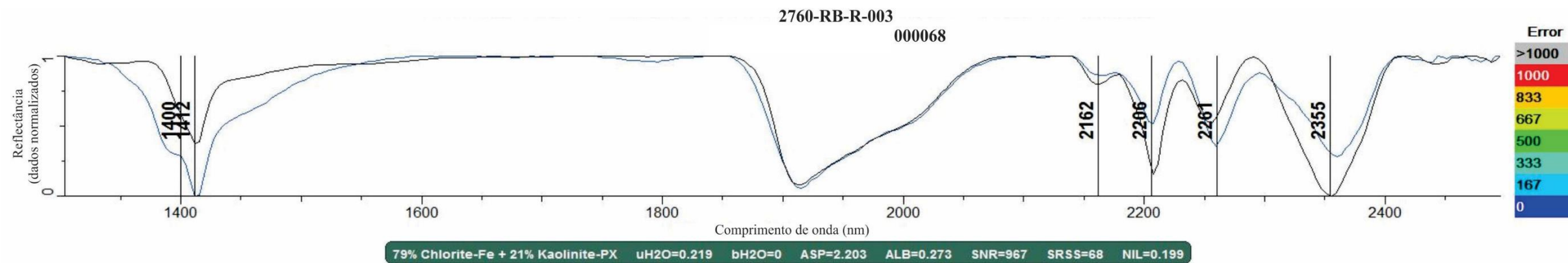
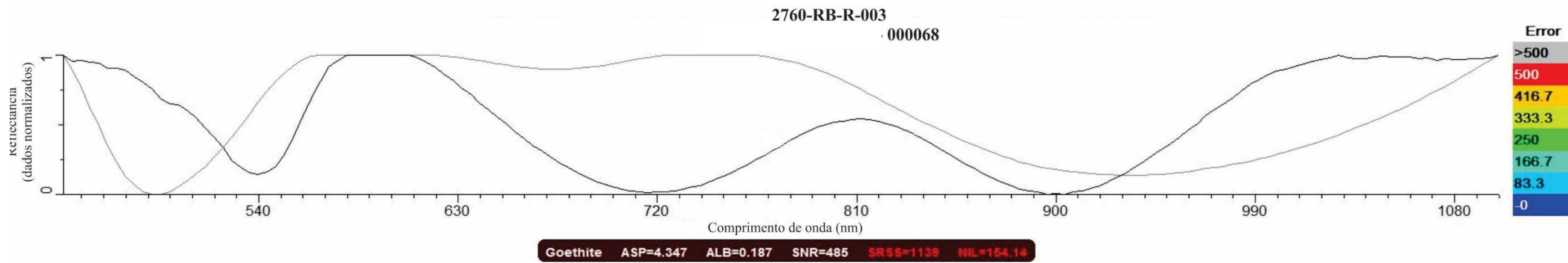
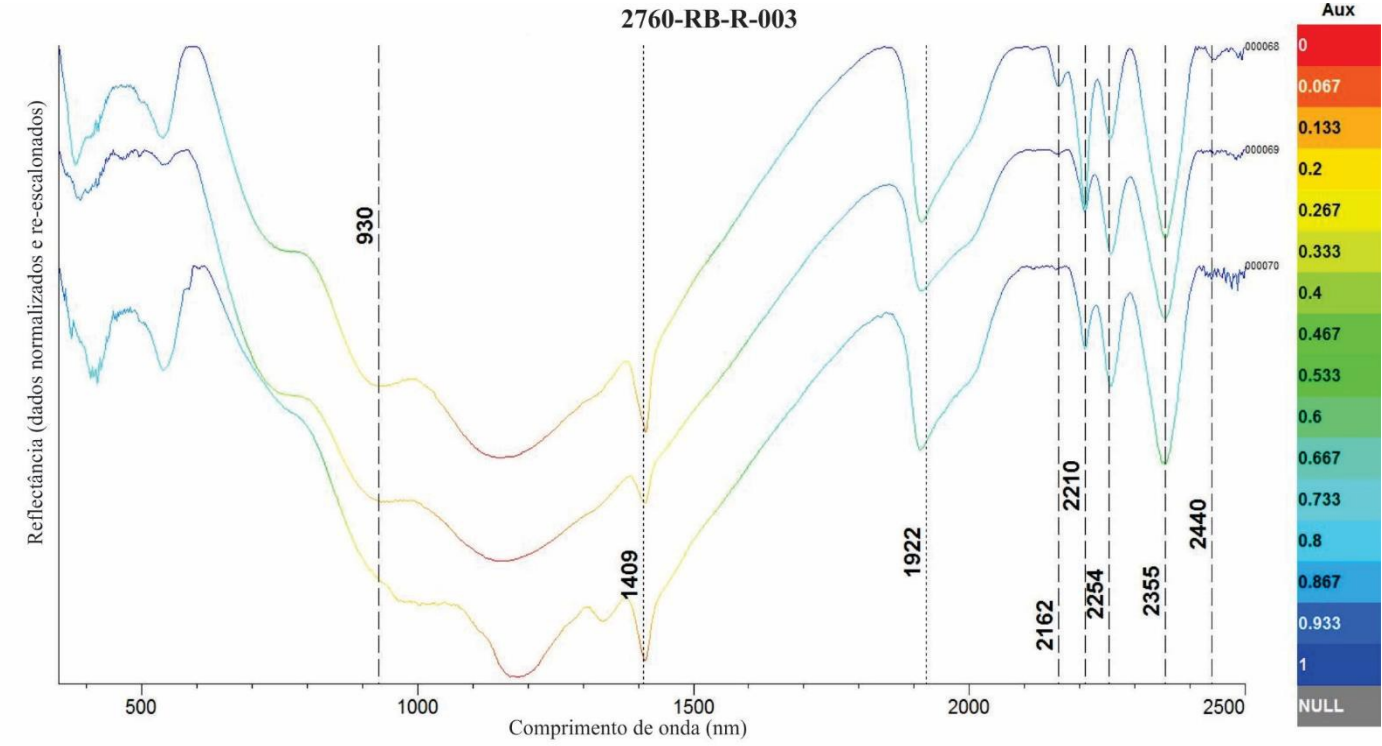
|   |   |                            |                      |                                |
|---|---|----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                       | <b>2760-RB-R-002</b>  |                            |                      |                                |
| <b>Latitude</b>                           | -30,91054100  |                            |                      |                                |
| <b>Longitude</b>                          | -53,44327900  |                            |                      |                                |
| <b>Rocha</b>                              | Arenito   |                            |                      |                                |
| <b>Descrição</b>                          | Rocha de coloração castanho-clara, de granulação variando de areia grossa a cascalho, intensamente alterada pelo hidrotermalismo e supergenicamente. Presença de minerais oxidados de Fe, sulfetos de Cu (bornita, calcosita, malaquita, crisocola) e carbonatos de Cu. |                            |                      |                                |
| <b>Alteração</b>                          | Halo de alteração com veios de barita   |                            |                      |                                |
| <b>Cod FieldSpec</b>                      | CMQ_URU_R_0005  | CMQ_URU_R_0006             | CMQ_URU_R_0007       | CMQ_URU_R_0008                 |
| <b>Cod TSG</b>                            | 000064  | 000065                     | 000066               | 000067                         |
| <b>Face</b>                               | Quebra natural  | Quebra natural             | Quebra natural       | Quebra natural                 |
| <b>Cor</b>                                | Branco  | Branco                     | Roxo                 | Marrom claro                   |
| <b>Relação Cristais-Fragmentos-Matriz</b> | Fenocristal   | Fenocristal                | Fragmento            | Matriz                         |
| <b>TSG</b>                                | Hemat + Ill Feng  | Hemat + Goetita + Ill Feng | Hematita e Chl Fe_Mg | Hematita e Chl Fe_Mg+ ill Feng |



**Espectros (reflectância)**  
**Amostra de rocha**  
**2760-RB-R-002**  
**Minas do Camaquã**

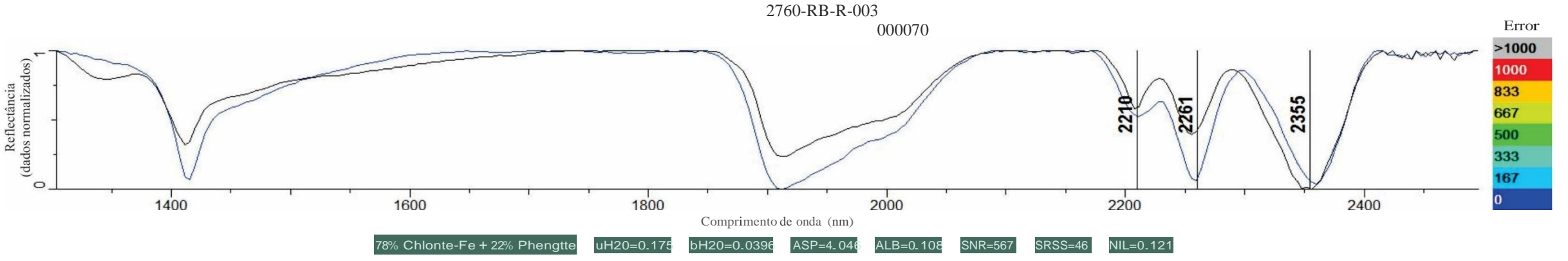
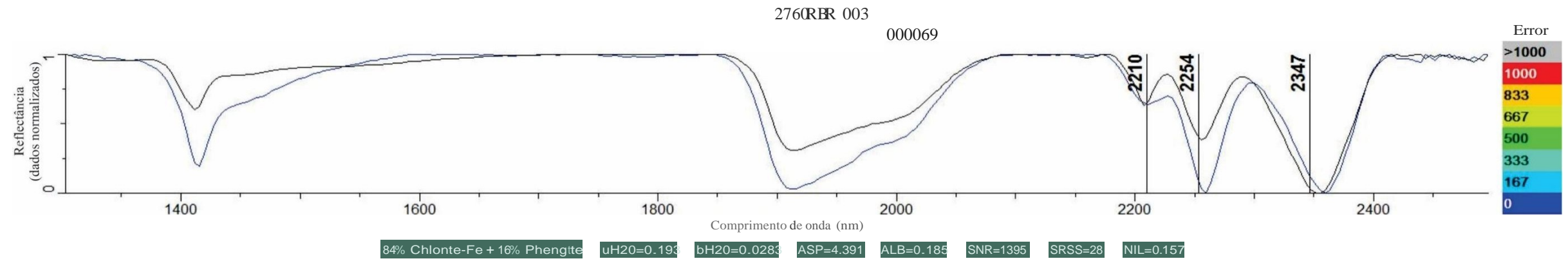
78% Hematite + 22% Goethite ASP=62.839 ALB=0.2 SNR=576 SRSS=68 NIL=10.21

|   |   |                      |                            |
|---|---|----------------------|----------------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                       | <b>2760-RB-R-003</b>                            |                      |                            |
| <b>Latitude</b>                           | -30,91009400                                    |                      |                            |
| <b>Longitude</b>                          | -53,44358300                                    |                      |                            |
| <b>Rocha</b>                              | Conglomerado                                    |                      |                            |
| <b>Descrição</b>                          | Conglomerado com alteração de clorita e oxidado |                      |                            |
| <b>Alteração</b>                          | Halo de alteração com clorita                   |                      |                            |
| <b>Cod FieldSpec</b>                      | CMQ_URU_R_0009                                  | CMQ_URU_R_0010       | CMQ_URU_R_0011             |
| <b>Cod TSG</b>                            | 000068  | 000069               | 000070                     |
| <b>Face</b>                               | Quebra natural                                  | Quebra natural       | Quebra natural             |
| <b>Cor</b>                                | Cinza esverdeado                                | Verde escuro         | Cinza esverdeado           |
| <b>Relação Cristais-Fragmentos-Matriz</b> | Matriz  | Fragmento            | Matriz+Fragmentos          |
| <b>TSG</b>                                | kaoli + chl Fe + Goetita                        | chl Fe_Mg + ili Feng | Goetita+ Ill feng + Chl Fe |



Espectros (reflectância)  
 Amostra de rocha  
 2760-RB-R-003  
 Minas do Camaquã  
 (continua)

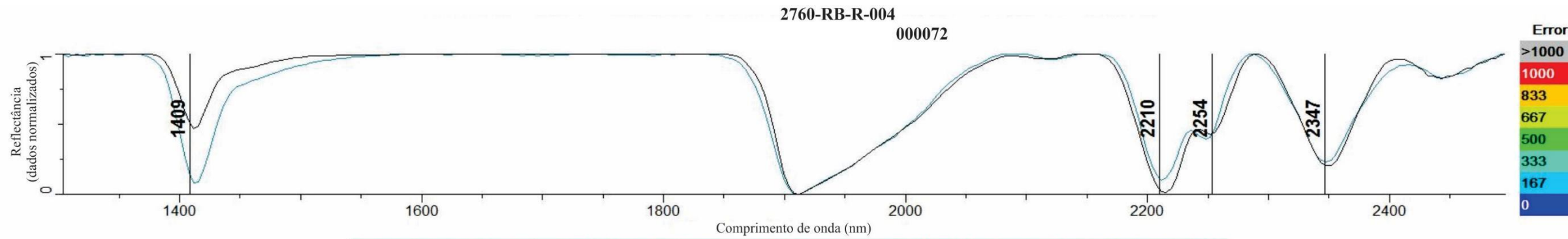
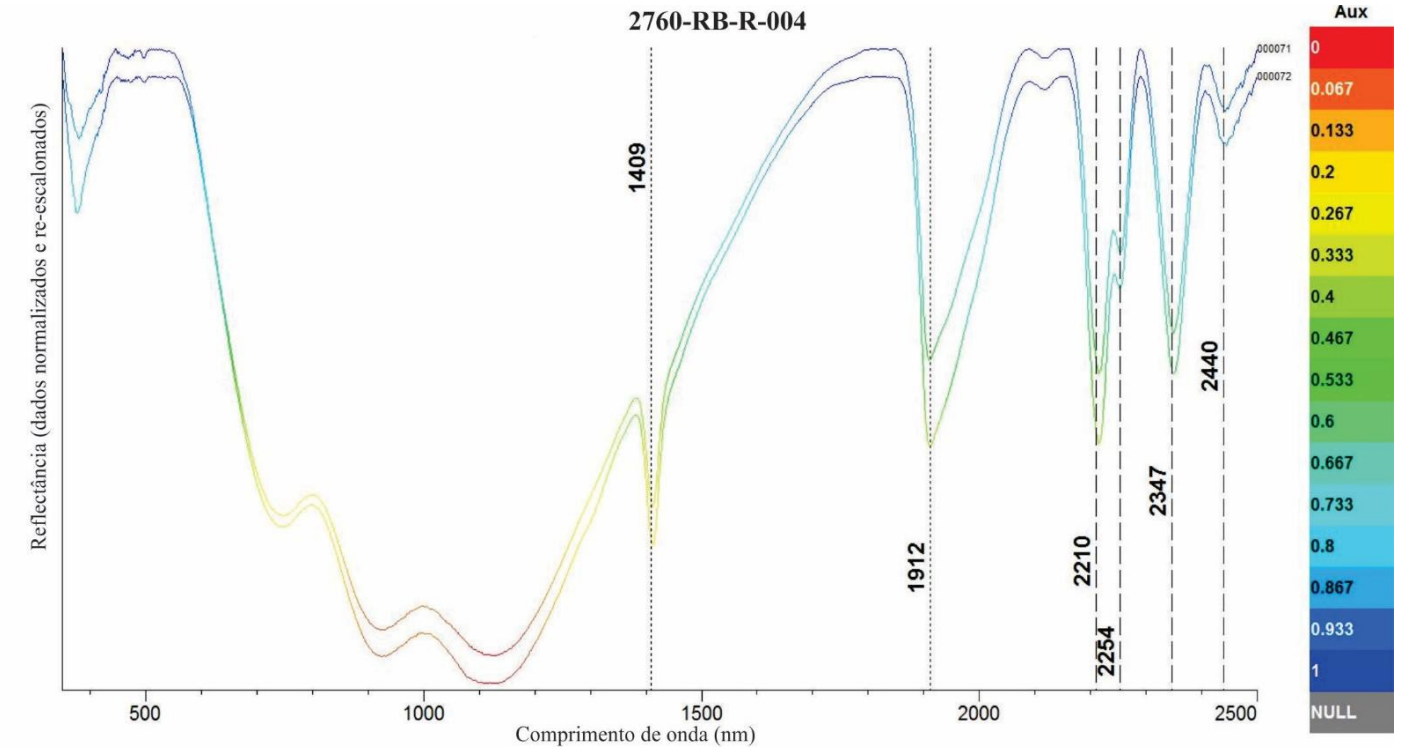




Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-003  
Minas do Camaquã  
(continuação)



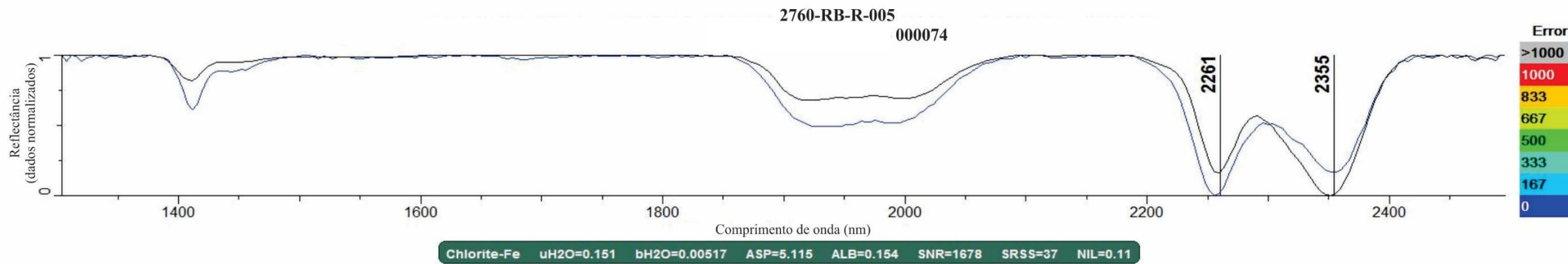
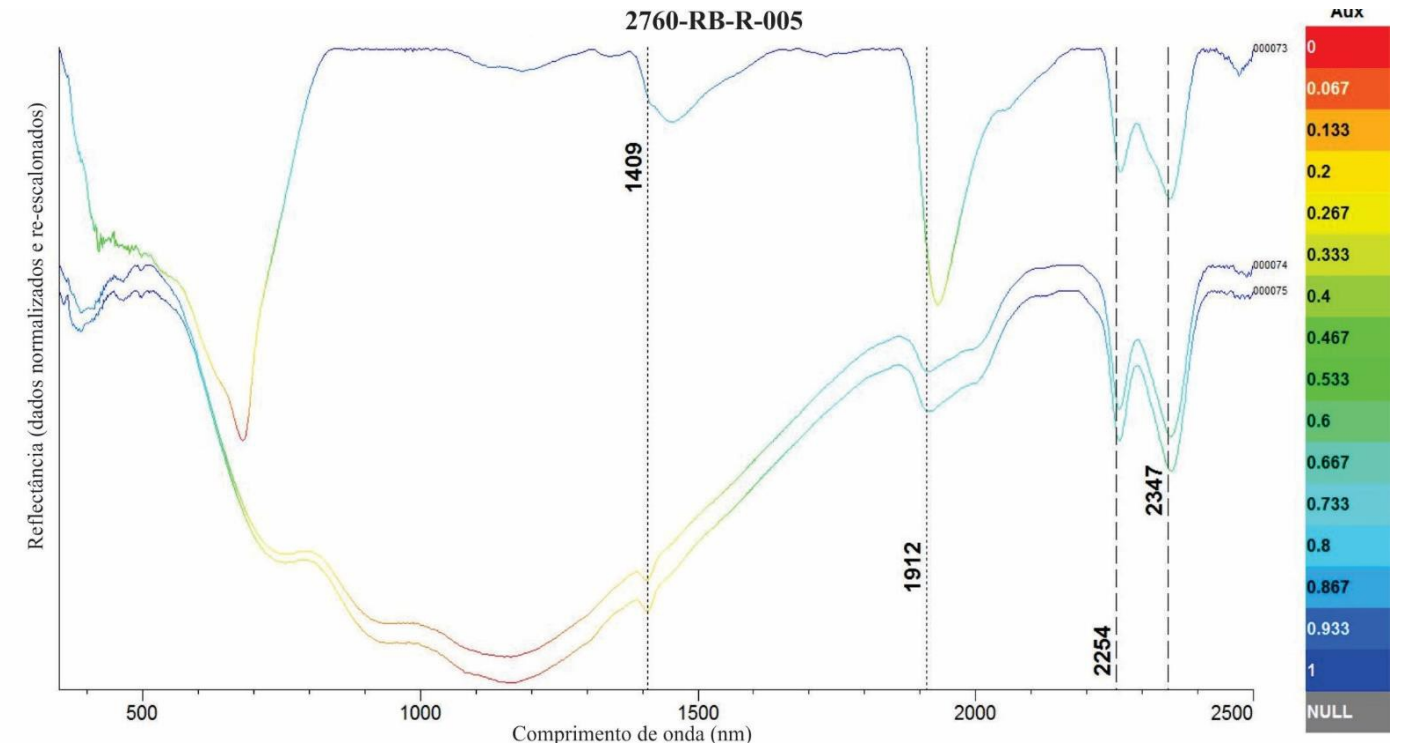
|   |  |                      |
|---|--|----------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                       | <b>2760-RB-R-004</b>   |                      |
| <b>Latitude</b>                           | -30,90965000   |                      |
| <b>Longitude</b>                          | -53,44393700   |                      |
| <b>Rocha</b>                              | Arenito  |                      |
| <b>Descrição</b>                          | Rocha de coloração cinza esverdeado, de granulação variando de areia grossa a muito grossa, com estratificação plano-paralela. Presença de sericita e sulfeto de Cu (bornita). |                      |
| <b>Alteração</b>                          | Halo de alteração com sericita. Ilita?   |                      |
| <b>Cod FieldSpec</b>                      | CMQ_URU_R_0012   | CMQ_URU_R_0013       |
| <b>Cod TSG</b>                            | 000071   | 000072               |
| <b>Face</b>                               | Quebra natural   | Quebra natural       |
| <b>Cor</b>                                | Verde claro  | Verde claro          |
| <b>Relação Cristais-Fragmentos-Matriz</b> | Matriz   | Matriz               |
| <b>TSG</b>                                | Ill feng + Chl Fe_Mg   | Ill feng + Chl Fe_Mg |



57% Phengiticillite + 43% Chlorite-FeMg uH2O=0.14 bH2O=0.0704 ASP=3.802 ALB=0.259 SNR=1172 SRSS=148 NIL=0.132

Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-004  
Minas do Camaquã

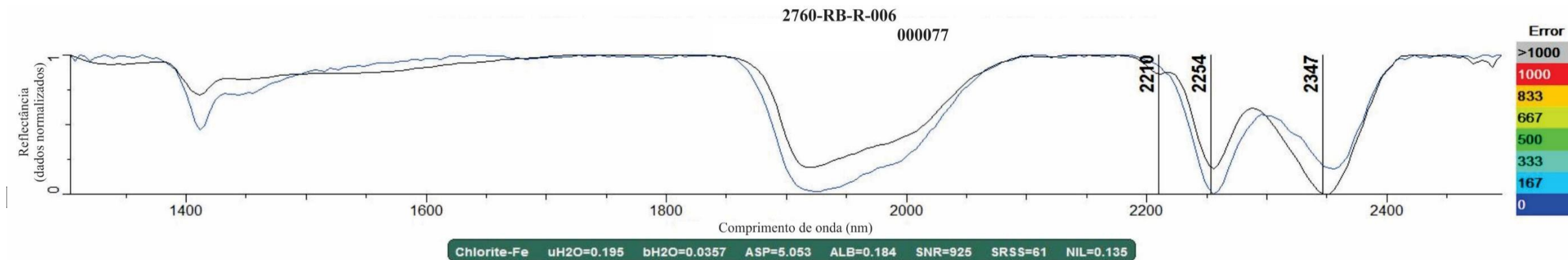
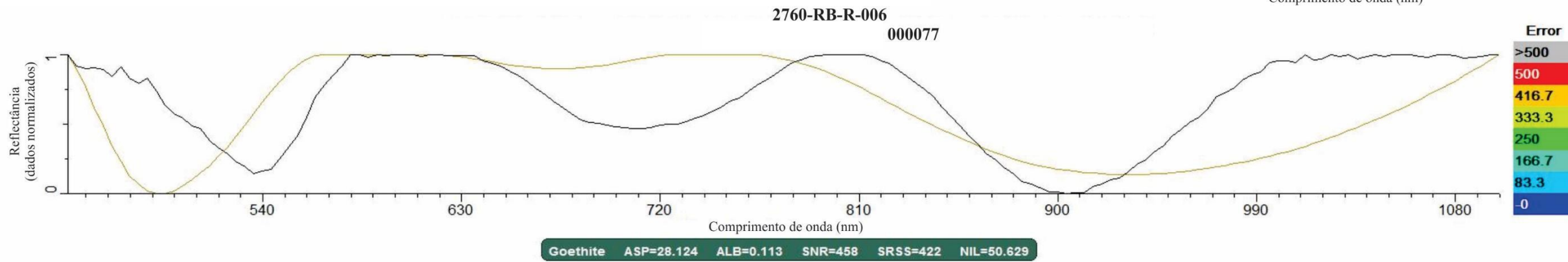
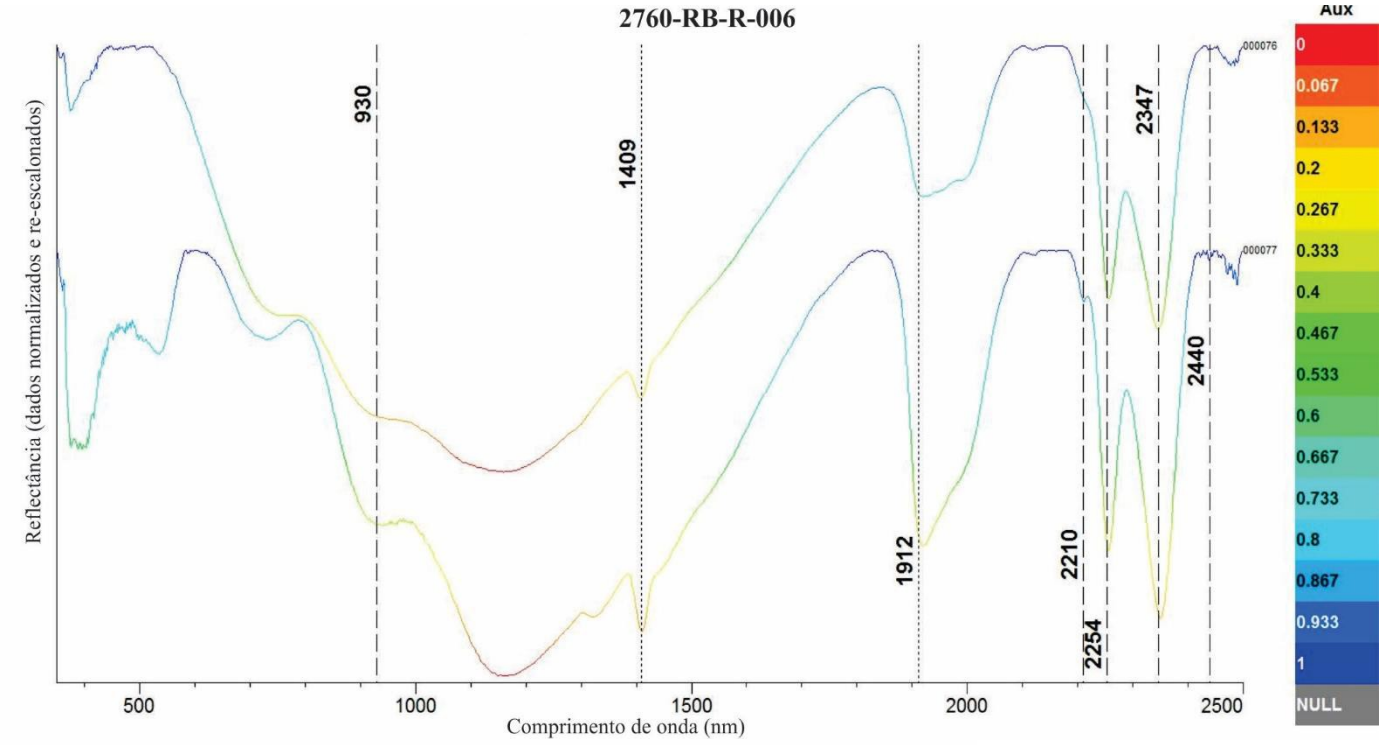
|                                    |   |                  |                  |
|------------------------------------|---|------------------|------------------|
| Amostra CPRM                       | 2760-RB-R-005   |                  |                  |
| Latitude                           | -30,90984800  |                  |                  |
| Longitude                          | -53,44368200  |                  |                  |
| Rocha                              | Arenito conglomerático  |                  |                  |
| Descrição                          | Rocha de coloração cinza-escuro, de granulação variando de cascalho a areia muito fina, cortada por vênulas (<1mm) de coloração branca, sem orientação, com sulfetos, argilização |                  |                  |
| Alteração                          | Halo de alteração com clorita/oxidação  |                  |                  |
| Cod FieldSpec                      | CMQ_URU_R_0014  | CMQ_URU_R_0015   | CMQ_URU_R_0016   |
| Cod TSG                            | 000073  | 000074           | 000075           |
| Face                               | Exposta   | Quebra natural   | Quebra natural   |
| Cor                                | Cinza escuro  | Cinza esverdeado | Cinza esverdeado |
| Relação Cristais-Fragmentos-Matriz | Matriz  | Matriz           | Fragmento        |
| TSG                                | Chl Fe  | Chl Fe           | Chl Fe           |



Espectros (reflectância)  
 Amostra de rocha  
 2760-RB-R-005  
 Minas do Camaquã



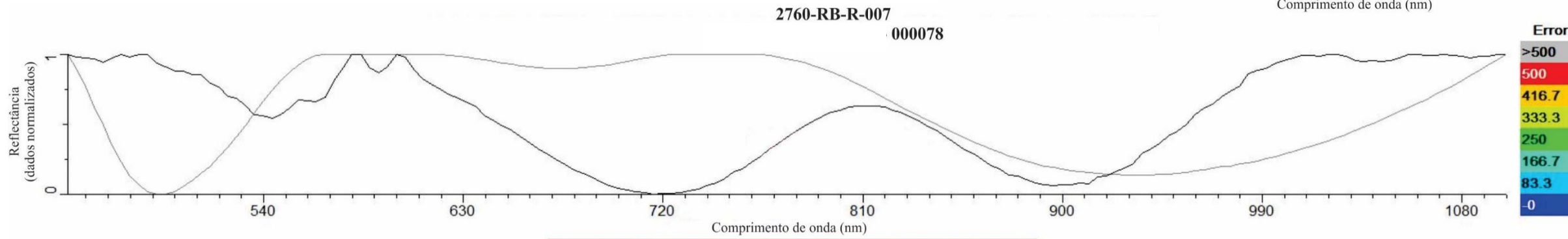
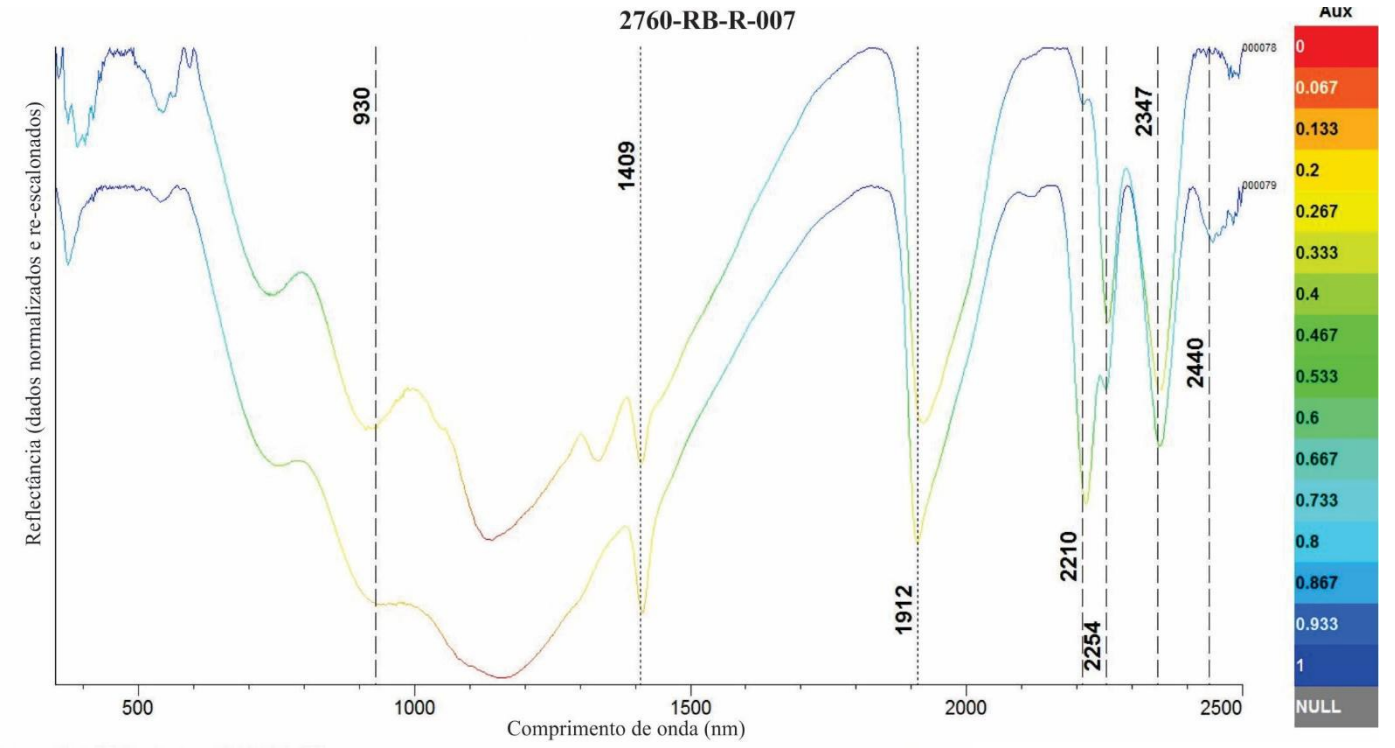
|   |   |                               |
|---|---|-------------------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                       | <b>2760-RB-R-006</b>  |                               |
| <b>Latitude</b>                           | -30,91062100  |                               |
| <b>Longitude</b>                          | -53,44273500  |                               |
| <b>Rocha</b>                              | Arenito conglomerático  |                               |
| <b>Descrição</b>                          | Arenito conglomerático de coloração cinza escuro esverdeado, com sulfeto de Cu disseminado. |                               |
| <b>Alteração</b>                          | Halo de alteração com clorita   |                               |
| <b>Cod FieldSpec</b>                      | CMQ_URU_R_0017  | CMQ_URU_R_0018                |
| <b>Cod TSG</b>                            | 000076  | 000077                        |
| <b>Face</b>                               | Quebra natural  | Quebra natural                |
| <b>Cor</b>                                | Cinza esverdeado  | Cinza esverdeado              |
| <b>Relação Cristais-Fragmentos-Matriz</b> | Matriz  | Matriz+Fragmentos             |
| <b>TSG</b>                                | Chl Fe_Mg   | Chl Fe_Mg + ill Feng+ Goetita |



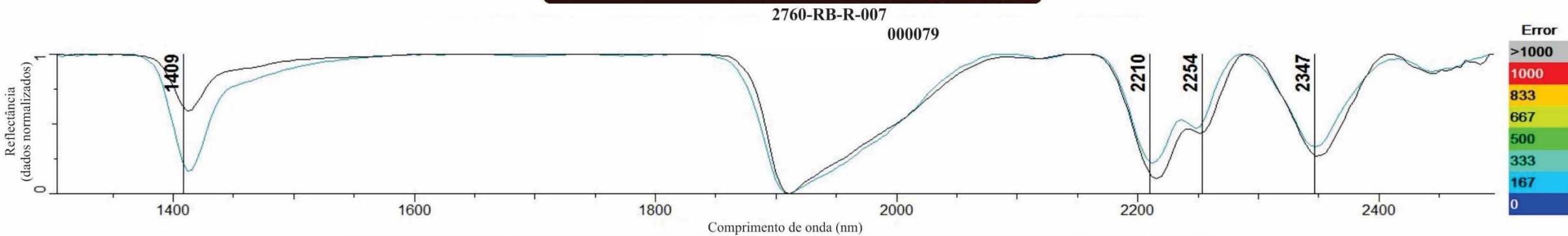
**Espectros (reflectância)**  
**Amostra de rocha**  
**2760-RB-R-006**  
**Minas do Camaquã**



|                                    |  |                      |
|------------------------------------|--|----------------------|
| Latitude                           | -30,91015600   |                      |
| Longitude                          | -53,44216200   |                      |
| Rocha                              | Conglomerado   |                      |
| Descrição                          | Conglomerado cinza escuro com sulfetos de Cu disseminados. |                      |
| Alteração                          | Halo de alteração com clorita                              |                      |
| Cod FieldSpec                      | CMQ_URU_R_0019   | CMQ_URU_R_0020       |
| Cod TSG                            | 000078   | 000079               |
| Face                               | Quebra natural   | Quebra natural       |
| Cor                                | Cinza escuro   | Cinza escuro         |
| Relação Cristais-Fragmentos-Matriz | Matriz+Fragmentos  | Matriz               |
| TSG                                | Chl Fe_Mg + ill Feng+ Goetita                              | Chl Fe_Mg + ill Feng |



Goethite ASP=5.346 ALB=0.106 SNR=182 SRSS=1248 NIL=167.14

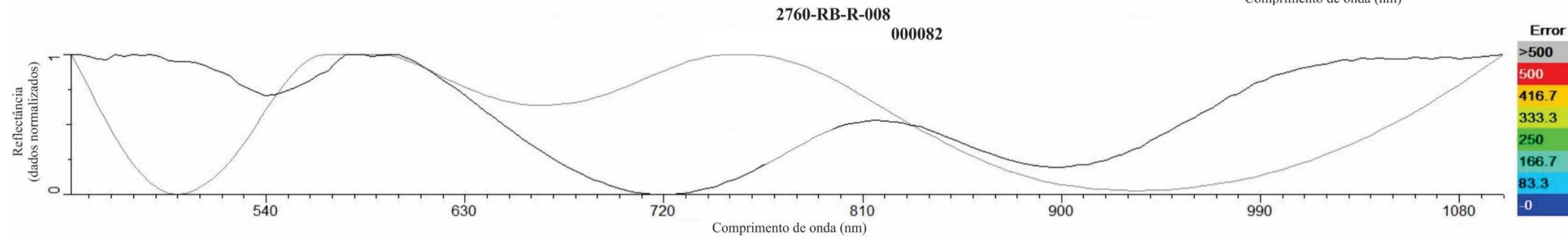
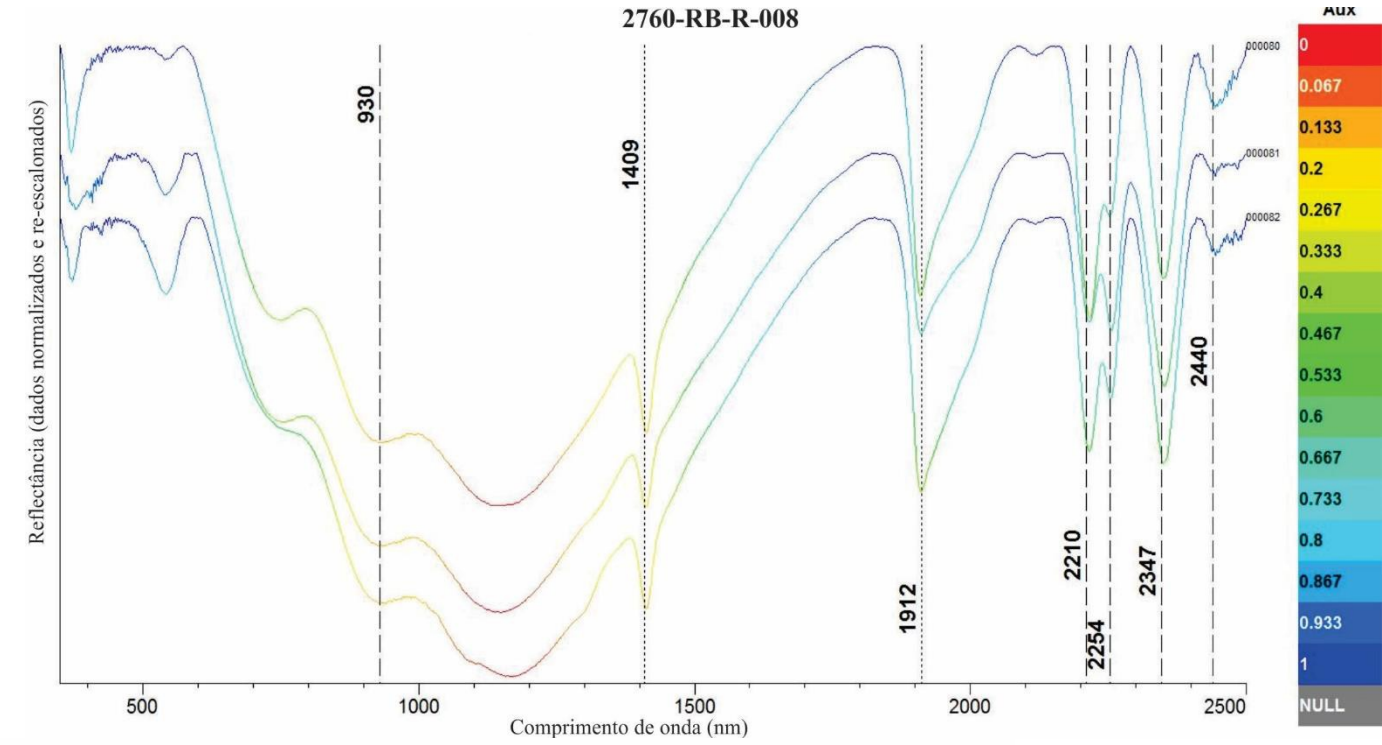


57% Phengiticillite + 43% Chlorite-FeMg uH2O=0.145 bH2O=0.0836 ASP=3.281 ALB=0.158 SNR=927 SRSS=171 NIL=0.17

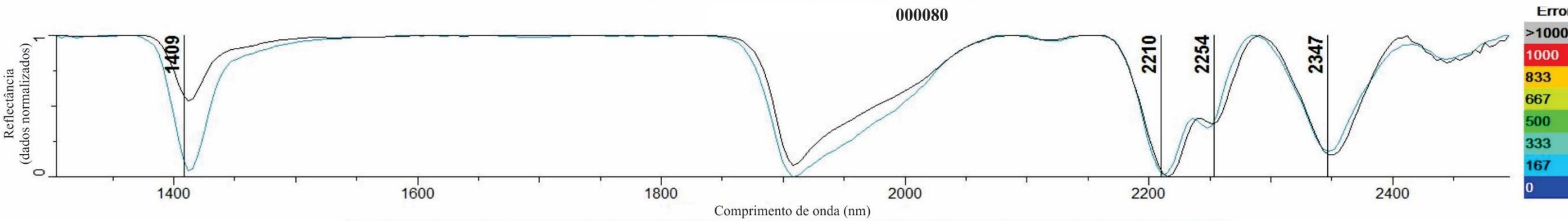
Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-007  
Minas do Camaquã



|                                    |  |                                |                      |
|------------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                | <b>2760-RB-R-008</b>   |                                |                      |
| Latitude                           | -30,90968100   |                                |                      |
| Longitude                          | -53,44278800   |                                |                      |
| Rocha                              | Conglomerado   |                                |                      |
| Descrição                          | Conglomerado cinza escuro com sulfetos de Cu disseminados (pirita, calcopirita, bornita) |                                |                      |
| Alteração                          | Halo de alteração com clorita  |                                |                      |
| Cod FieldSpec                      | CMQ_URU_R_0021   | CMQ_URU_R_0022                 | CMQ_URU_R_0023       |
| Cod TSG                            | 000080   | 000081                         | 000082               |
| Face                               | Quebra natural   | Quebra natural                 | Quebra natural       |
| Cor                                | Cinza esverdeado   | Rosa claro                     | Cinza esverdeado     |
| Relação Cristais-Fragmentos-Matriz | Matriz   | Fragmento                      | Matriz+Fragmentos    |
| TSG                                | Chl Fe_Mg + ill Feng   | Chl Fe_Mg + ill Feng + Goetita | Chl Fe_Mg + ill Feng |



**Goethite ASP=1.074 ALB=0.108 SNR=194 SRSS=2977 NIL=368.07**

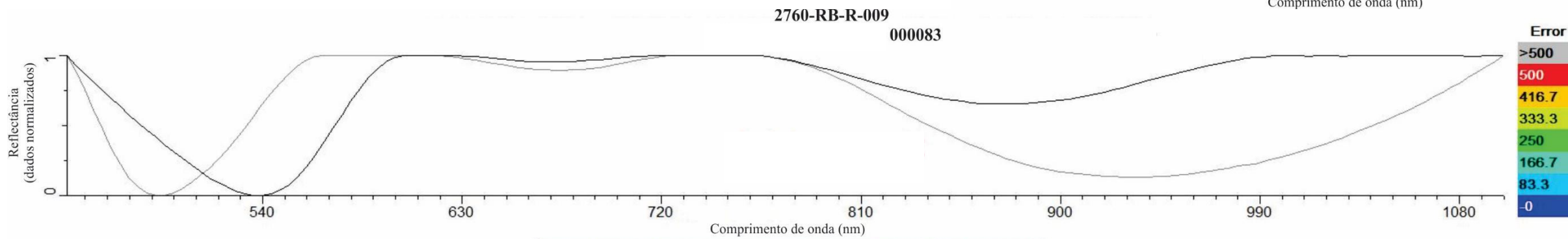
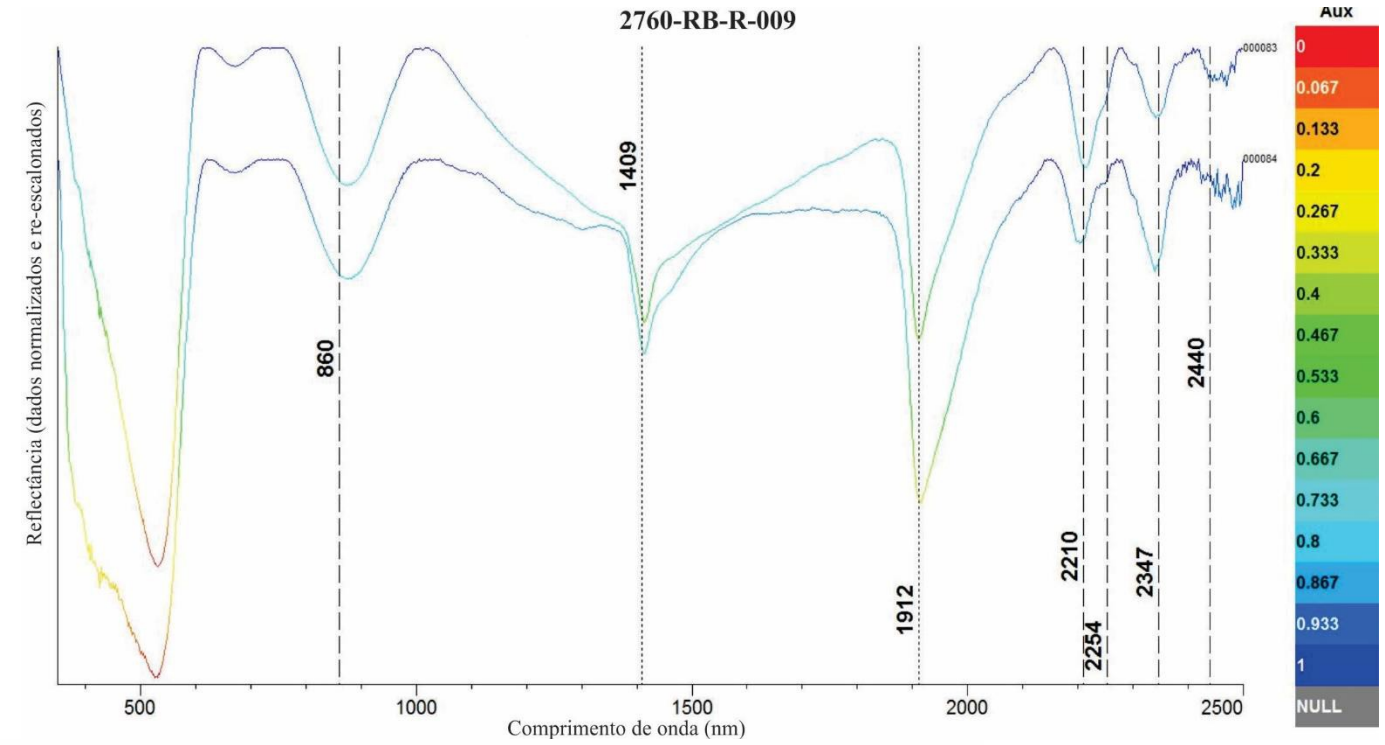


**58% Phengiticillite + 42% Chlorite-FeMg uH2O=0.109 bH2O=0.0849 ASP=3.528 ALB=0.168 SNR=838 SRSS=164 NIL=0.158**

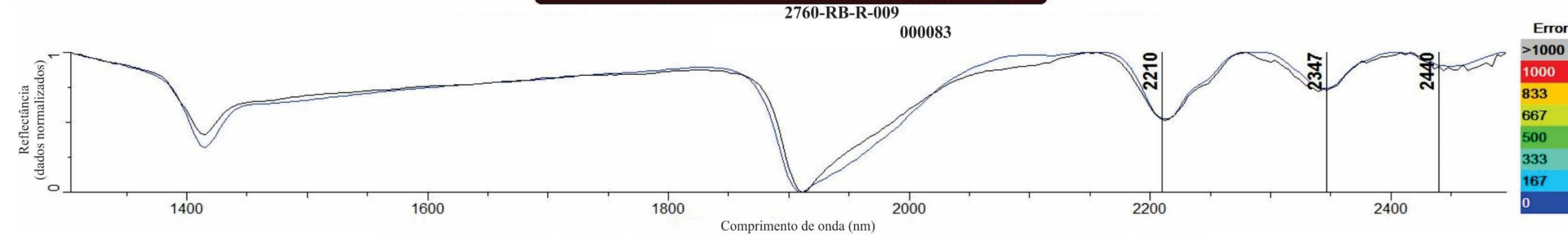
**Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-008  
Minas do Camaquã**



|                                    |  |                                |
|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Amostra CPRM                       | 2760-RB-R-009                                |                                |
| Latitude                           | -30,90812500                                 |                                |
| Longitude                          | -53,44434200                                 |                                |
| Rocha                              | Conglomerado                                 |                                |
| Descrição                          | Conglomerado superior, avermelhado, alterado |                                |
| Alteração                          |  |                                |
| Cod FieldSpec                      | CMQ_URU_R_0024                               | CMQ_URU_R_0025                 |
| Cod TSG                            | 000083                                       | 000084                         |
| Face                               | Quebra natural                               | Quebra natural                 |
| Cor                                | Vermelho                                     | Vermelho claro                 |
| Relação Cristais-Fragmentos-Matriz | Matriz                                       | Matriz+Fragmentos              |
| TSG                                | Ill Feng + Goetita                           | ill (Ms) + Chl Fe_Mg + Goetita |



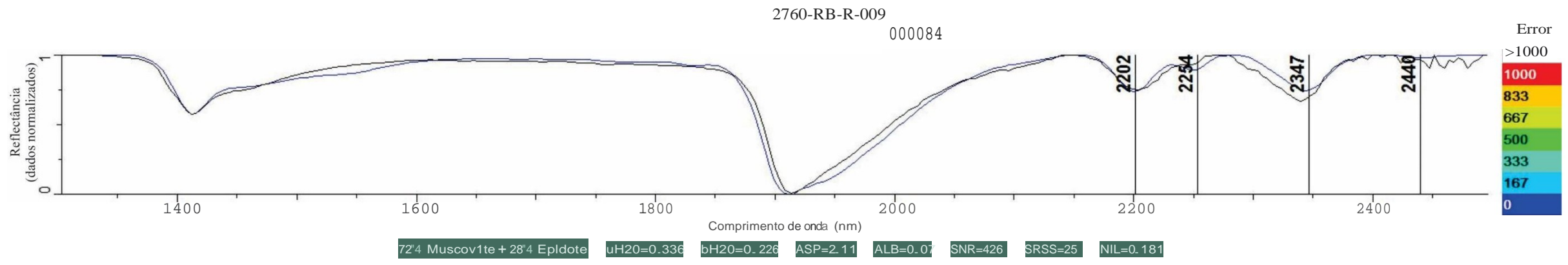
Goethite ASP=13.215 ALB=0.148 SNR=1412 SRSS=1519 NIL=129.01



82% Phengiticillite + 18% Ankerite uH2O=0.147 bH2O=0.206 ASP=4.227 ALB=0.126 SNR=374 SRSS=42 NIL=0.148

**Espectros (refletância)**  
 Amostra de rocha  
 2760-RB-R-009  
 Minas do Camaquã

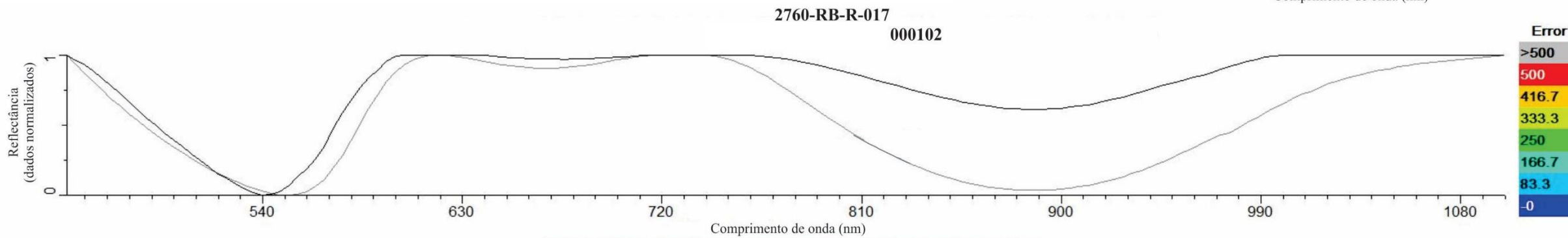
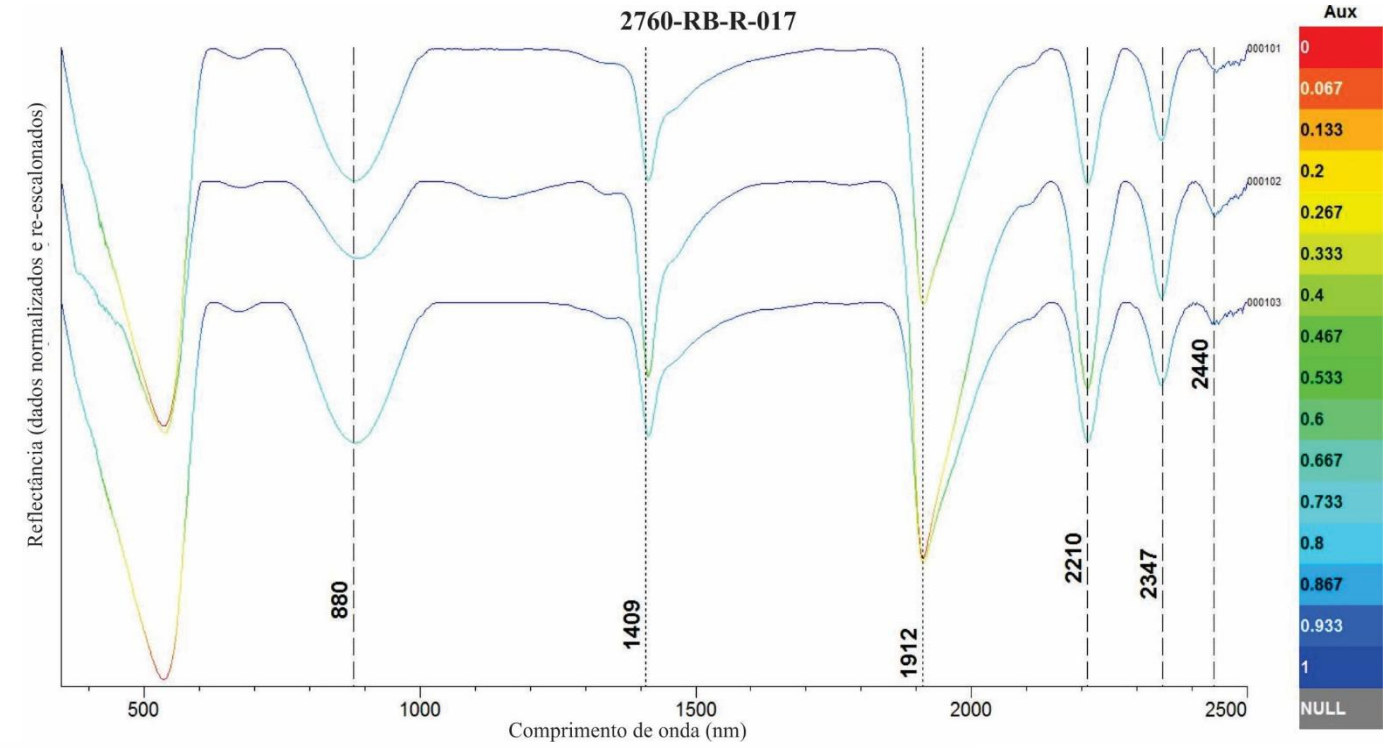
(continua)



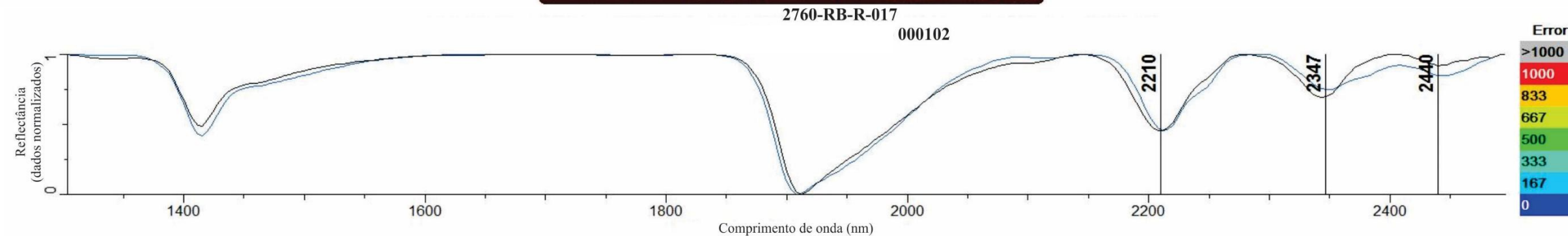
Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-009  
Minas do Camaquã  
(continuação)



|   |   |                  |                   |
|---|---|------------------|-------------------|
| <b>Amostra CPRM</b>                       | <b>2760-RB-R-017</b>  |                  |                   |
| <b>Latitude</b>                           | -30,89901600  |                  |                   |
| <b>Longitude</b>                          | -53,43373900  |                  |                   |
| <b>Rocha</b>                              | Conglomerado  |                  |                   |
| <b>Descrição</b>                          | Conglomerado de coloração avermelhada. Corte de estrada, arenito/conglomerado (área externa à mina) |                  |                   |
| <b>Alteração</b>                          |   |                  |                   |
| <b>Cod FieldSpec</b>                      | CMQ_URU_R_0042  | CMQ_URU_R_0043   | CMQ_URU_R_0044    |
| <b>Cod TSG</b>                            | 000101  | 000102           | 000103            |
| <b>Face</b>                               | Quebra natural  | Quebra natural   | Quebra natural    |
| <b>Cor</b>                                | Vermelho  | Branco           | Vermelho          |
| <b>Relação Cristais-Fragmentos-Matriz</b> | Matriz+Fragmentos   | Fragmento        | Matriz+Fragmentos |
| <b>TSG</b>                                | Ill Feng + Hemat  | Ill Feng + Hemat | Ill Feng + Hemat  |



**Hematite ASP=16.105 ALB=0.281 SNR=2182 SRSS=961 NIL=74.346**



**Phengiticillite uH2O=0.198 bH2O=0.237 ASP=5.677 ALB=0.345 SNR=1020 SRSS=84 NIL=0.128**

**Espectros (reflectância)  
Amostra de rocha  
2760-RB-R-017  
Minas do Camaquã**



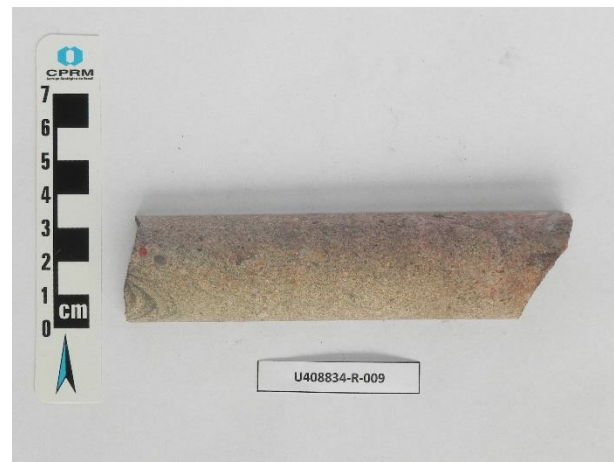
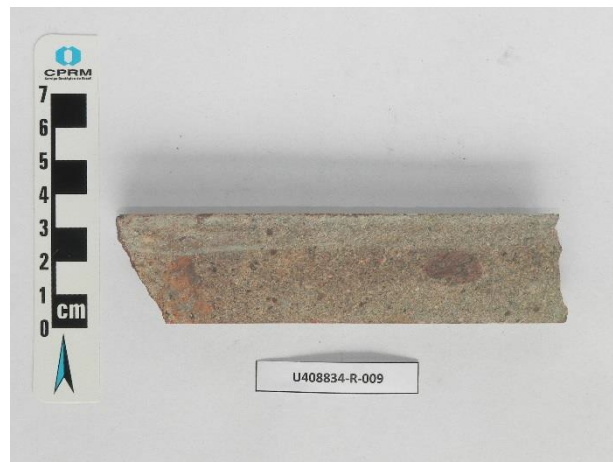
**Anexo B: Amostras de Testemunhos – Localização, Descrição e Espectros de Reflectância**

| Amostras   | Prof (m) | Cod TSG         | Rocha                                   | Zona   |
|------------|----------|-----------------|---|--|
| U408834_01 | 12,12    | 000104 a 000106 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita       |
| U408834_02 | 16,02    | 000107 a 000110 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita       |
| U408834_03 | 21,26    | 000111 a 000114 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita                                |
| U408834_04 | 27,13    | 000115 a 000117 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita |
| U408834_05 | 37,55    | 000118 a 000121 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Zona de brecha (sulfetos e rocha hospedeira cimentados por quartzo e hematita)   |
| U408834_06 | 38,95    | 000122 a 000123 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita |
| U408834_07 | 46,53    | 000124 a 000126 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita |
| U408834_08 | 50,35    | 000127 a 000129 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita                                |
| U408834_09 | 57,55    | 000130 a 000132 | Arenito grosso a arenito médio          | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita                                |



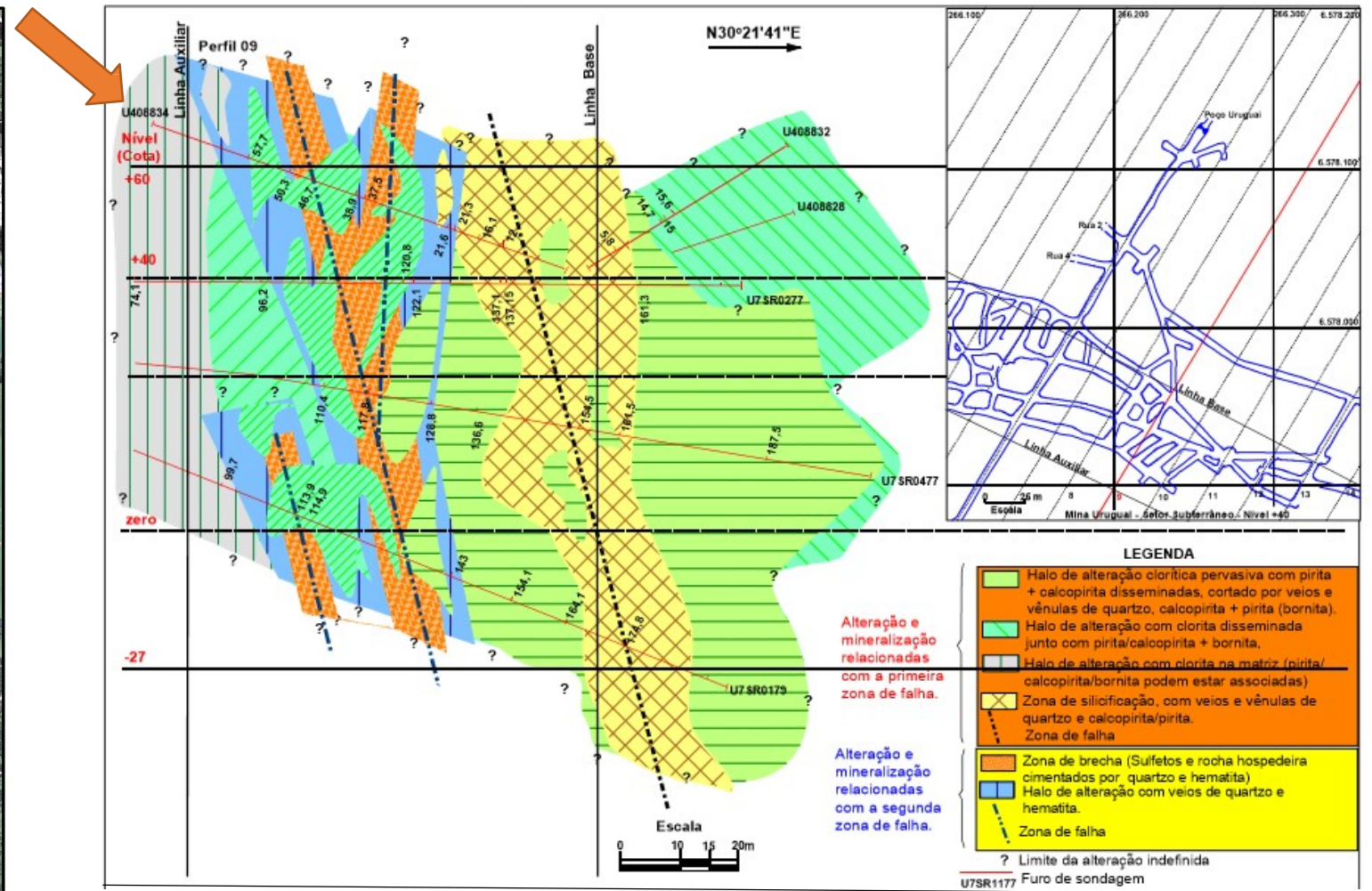
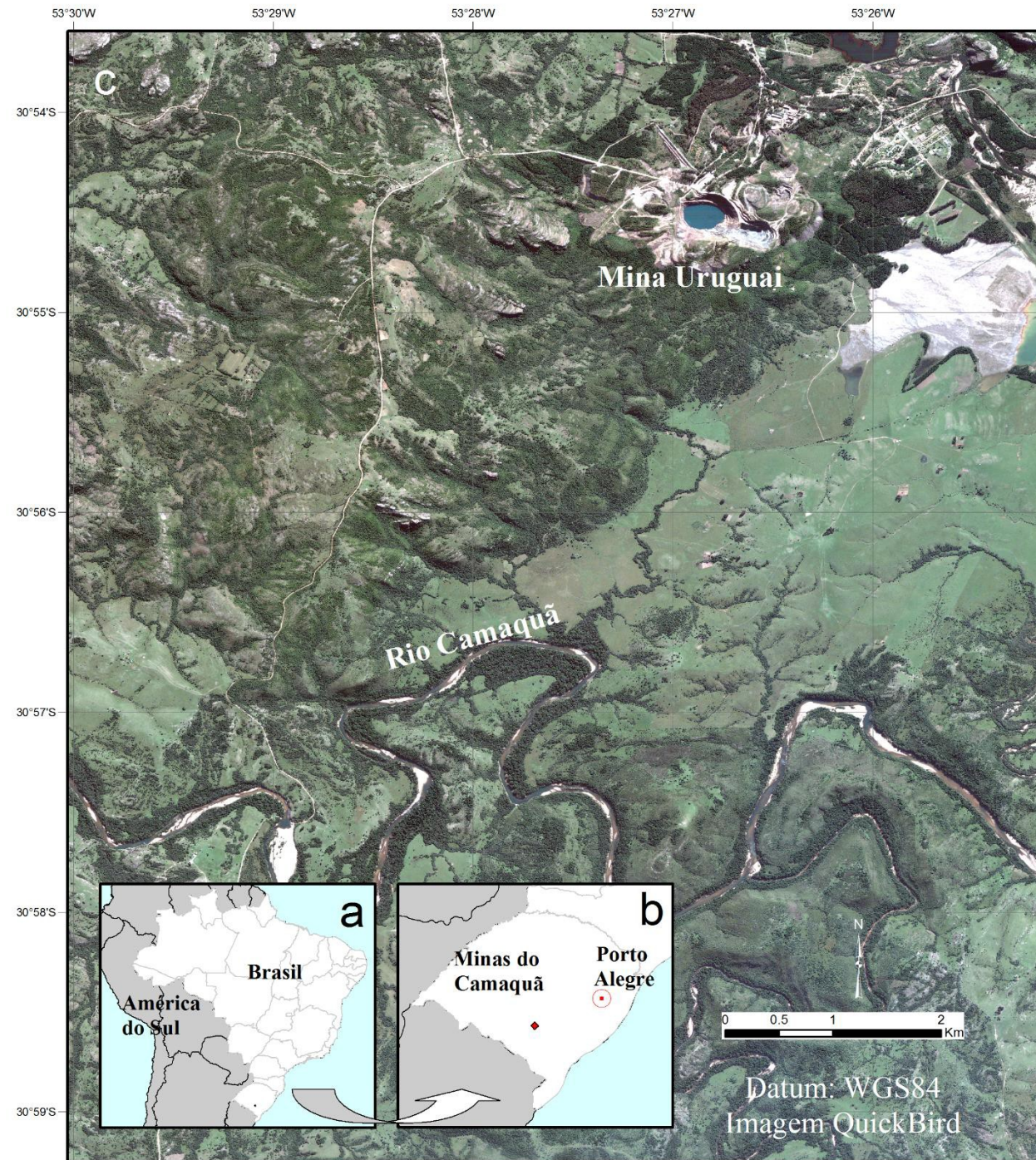
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U408834  
Minas do Camaquã





Amostras de testemunho de sondagem  
U408834  
Minas do Camaquã



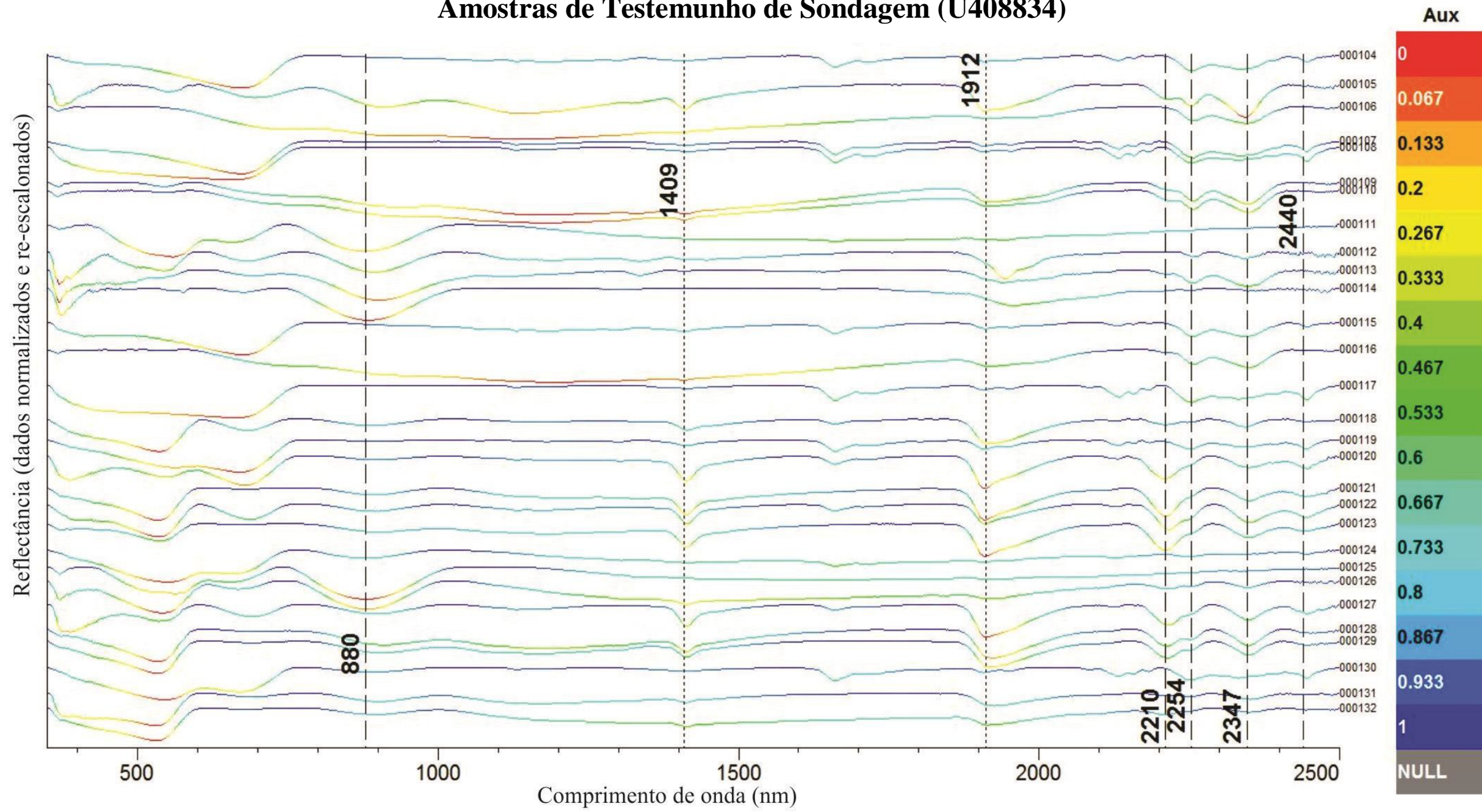


Fonte: Laux (1999)

Localização Amostras de testemunho de sondagem U408834 Minas do Camaquã



### Amostras de Testemunho de Sondagem (U408834)



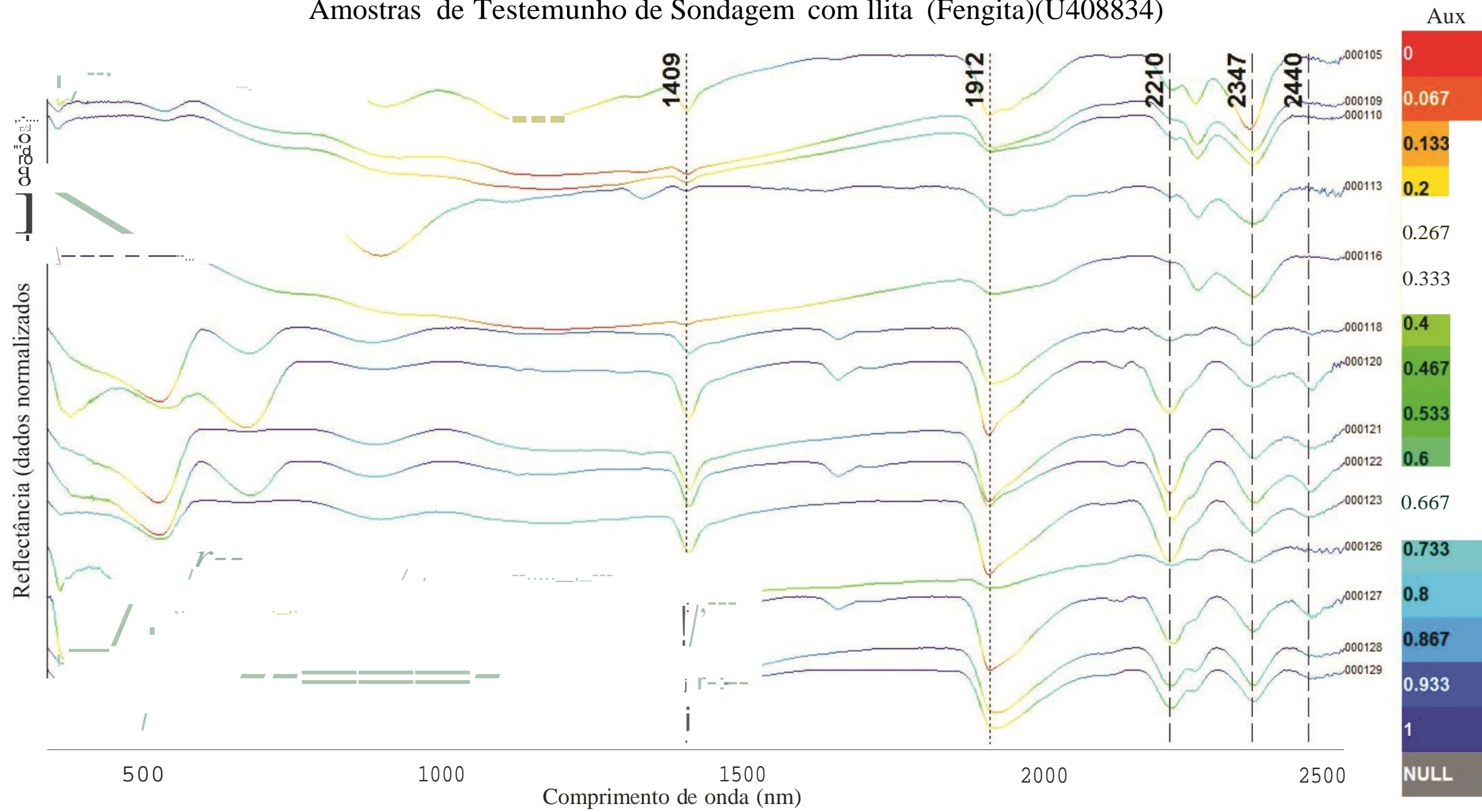
Espectros (reflectância)  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U408834  
Minas do Camaquã

| Furo       | Prof (m) | Cod TSG | Minerais   |  |  |   |         |
|------------|----------|---------|--|--|--|---|---------|
|            |          |         | Ilita Fengita (III Feng)<br>Feições Abs: 2210, 2347 e 2440 | Ilita Muscovita (III Ms)<br>Feições Abs: 2202, 2347 e 2440 | Clorita Ferro-Magnésiana (Chl_Fe_Mg)<br>Feições Abs: 2254 e 2347 | Hematita e Goetita<br>Feições Abs: VNIR (860 e 930) | Sulfeto |
| U408834_01 | 12,12    | 000104  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_01 | 12,12    | 000105  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_01 | 12,12    | 000106  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_02 | 16,02    | 000107  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   | Sulfeto |
| U408834_02 | 16,02    | 000108  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_02 | 16,02    | 000109  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_02 | 16,02    | 000110  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_03 | 21,26    | 000111  |  |  |  |   | Sulfeto |
| U408834_03 | 21,26    | 000112  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_03 | 21,26    | 000113  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_03 | 21,26    | 000114  |  |  |  | Hematita  |         |
| U408834_04 | 27,13    | 000115  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_04 | 27,13    | 000116  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_04 | 27,13    | 000117  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_05 | 37,55    | 000118  | Ilita Feng   |  |  | Goetita   |         |
| U408834_05 | 37,55    | 000119  |  |  |  |   | Sulfeto |
| U408834_05 | 37,55    | 000120  | Ilita Feng   |  |  |   |         |
| U408834_05 | 37,55    | 000121  | Ilita Feng   |  |  |   |         |
| U408834_06 | 38,95    | 000122  | Ilita Feng   |  |  | Goetita   |         |
| U408834_06 | 38,95    | 000123  | Ilita Feng   |  |  | Goetita   |         |
| U408834_07 | 46,53    | 000124  |  |  |  | Hematita  |         |
| U408834_07 | 46,53    | 000125  |  |  |  | Hematita  | Sulfeto |
| U408834_07 | 46,53    | 000126  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Hematita  |         |
| U408834_08 | 50,35    | 000127  | Ilita Feng   |  |  |   |         |
| U408834_08 | 50,35    | 000128  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_08 | 50,35    | 000129  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U408834_09 | 57,55    | 000130  |  |  |  | Hematita/Goetita                                    |         |
| U408834_09 | 57,55    | 000131  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Hematita/Goetita                                    |         |
| U408834_09 | 57,55    | 000132  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Hematita/Goetita                                    |         |

Síntese Análise dos  
Espectros (reflectância)  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U408834  
Mina do Camaquã



### Amostras de Testemunho de Sondagem com Ilita (Fengita)(U408834)

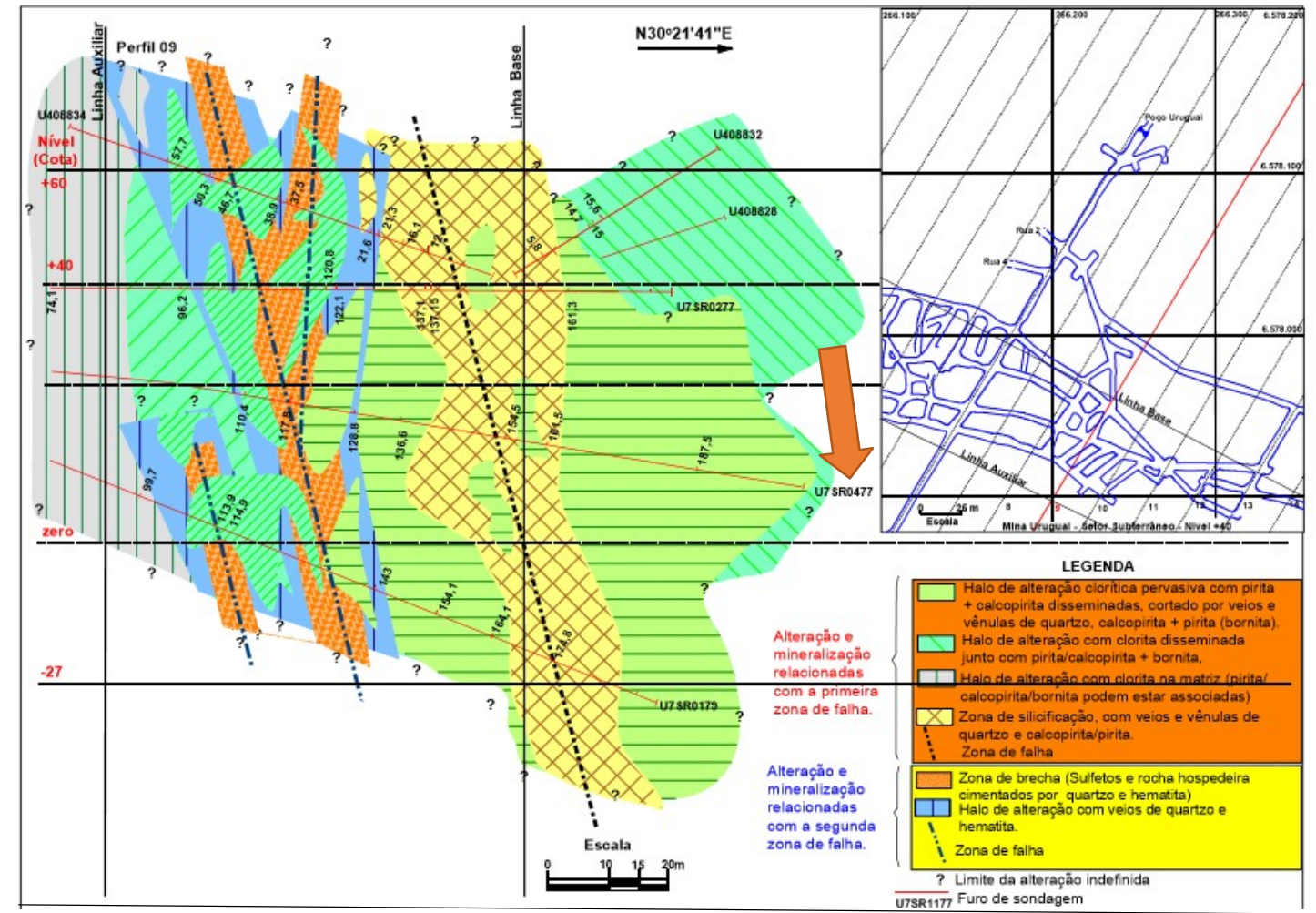
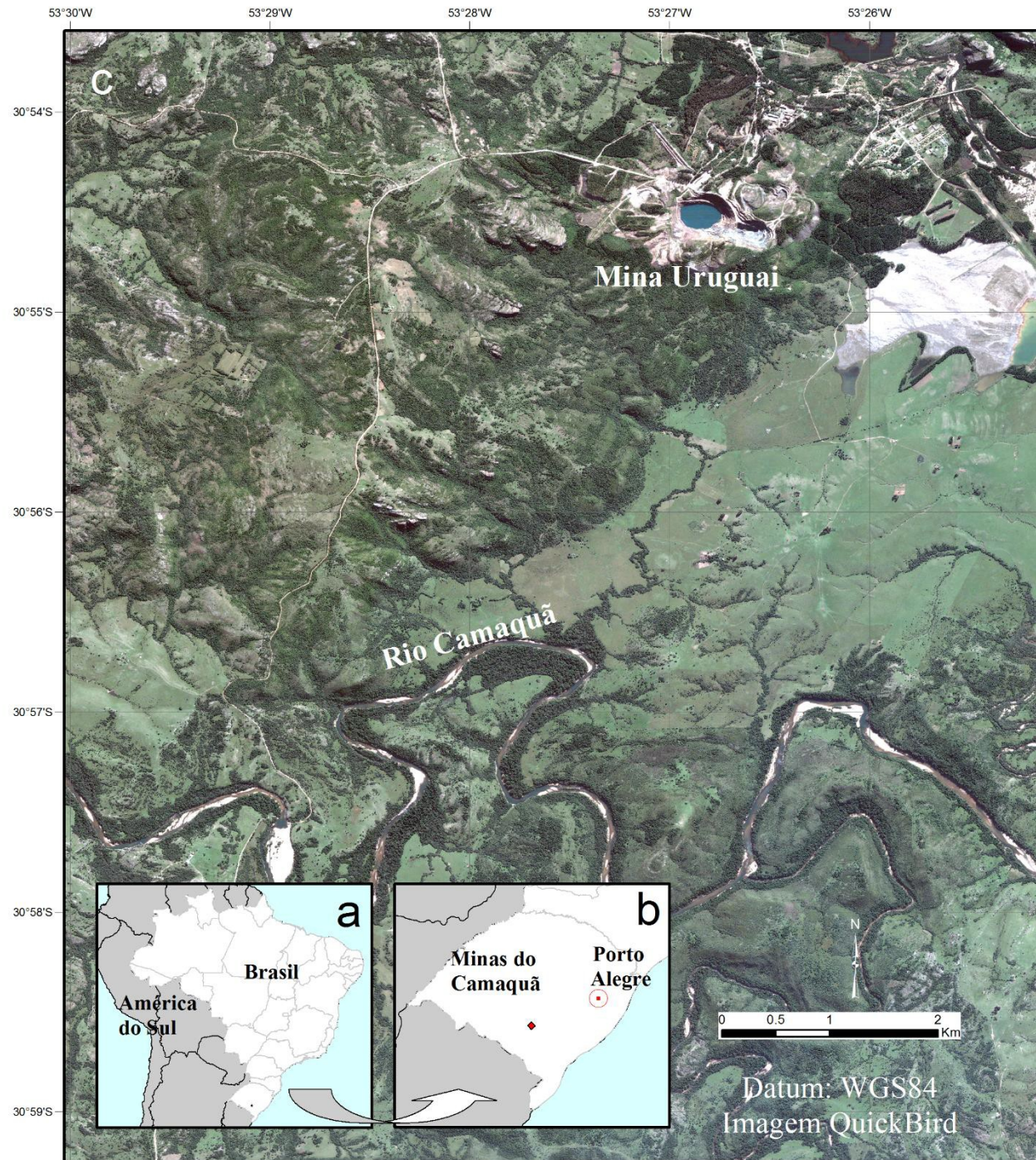


Espectros (reflectância)  
Cristalinidade Ilita  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U408834  
Minas do Camaquã

| Amostras    | Prof (m) | Cod TSG         | Rocha                                   | Zona  |
|-------------|----------|-----------------|---|---|
| U7SR0277_01 | 74,15    | 000133 a 000135 | Arenito grosso a arenito médio          | Halo de alteração com cloritana matriz (pirita / calcopirita / bornita podem estar associadas)  |
| U7SR0277_02 | 96,08    | 000136 a 000139 | Arenito conglomerático a arenito grosso | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita  |
| U7SR0277_03 | 120,50   | 000140 a 000142 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com clorita disseminada junto com pirita/calcopirita + bornita  |
| U7SR0277_04 | 122,10   | 000143 a 000144 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração com veios de quartzo e hematita   |
| U7SR0277_05 | 137,15   | 000145 a 000146 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Zona de silicificação, com veios e vênulas de quartzo e calcopirita/pirita  |
| U7SR0277_06 | 161,40   | 000147 a 000148 | Conglomerado a arenito conglomerático   | Halo de alteração clorítica pervasiva com pirita + calcopirita disseminadas, cortado por veios e vênulas de quartzo, calcopirita + pirita (bornita) |



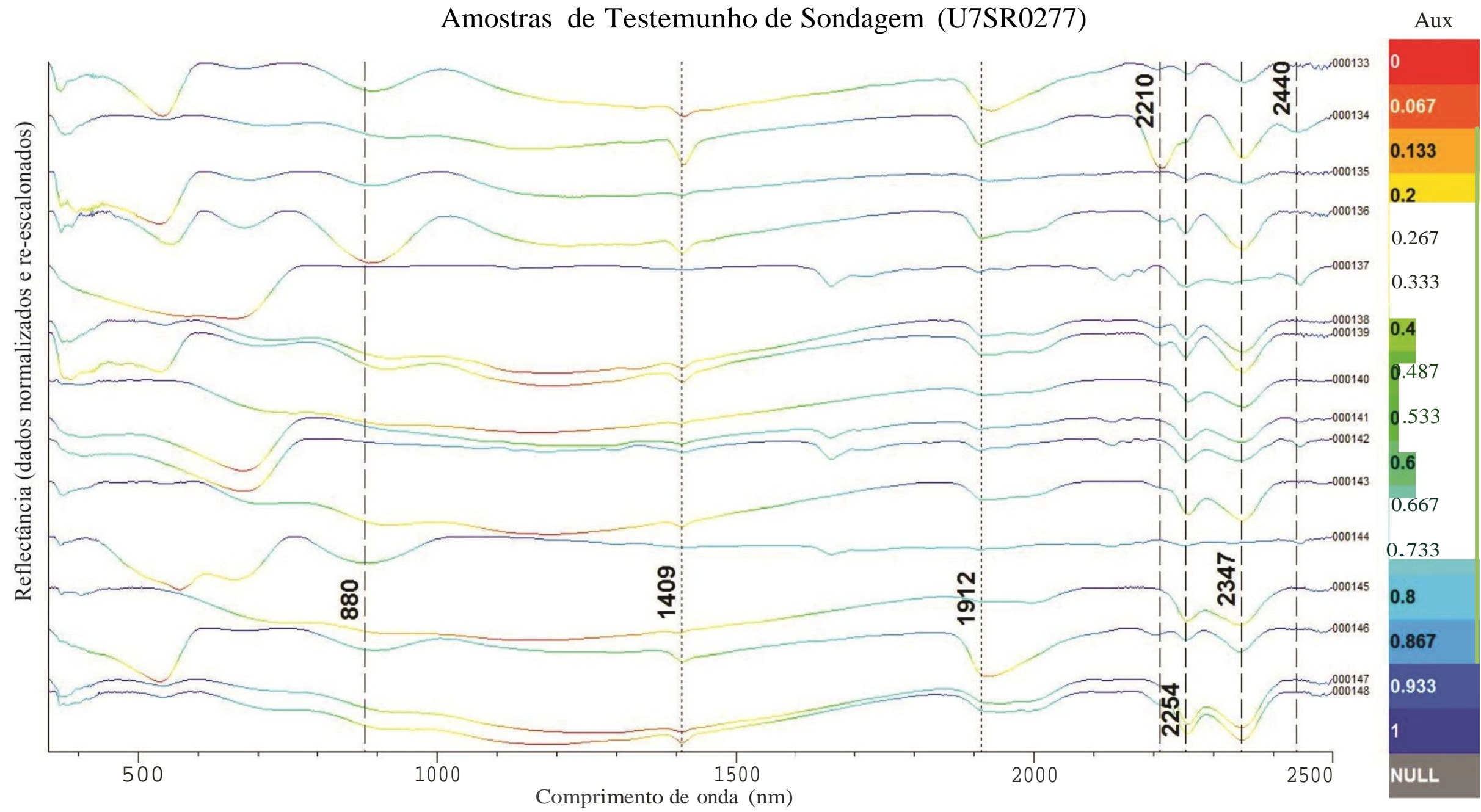




Fonte: Laux (1999)

Localização Amostras de testemunho de sondagem U7SR0277 Minas do Camaquã



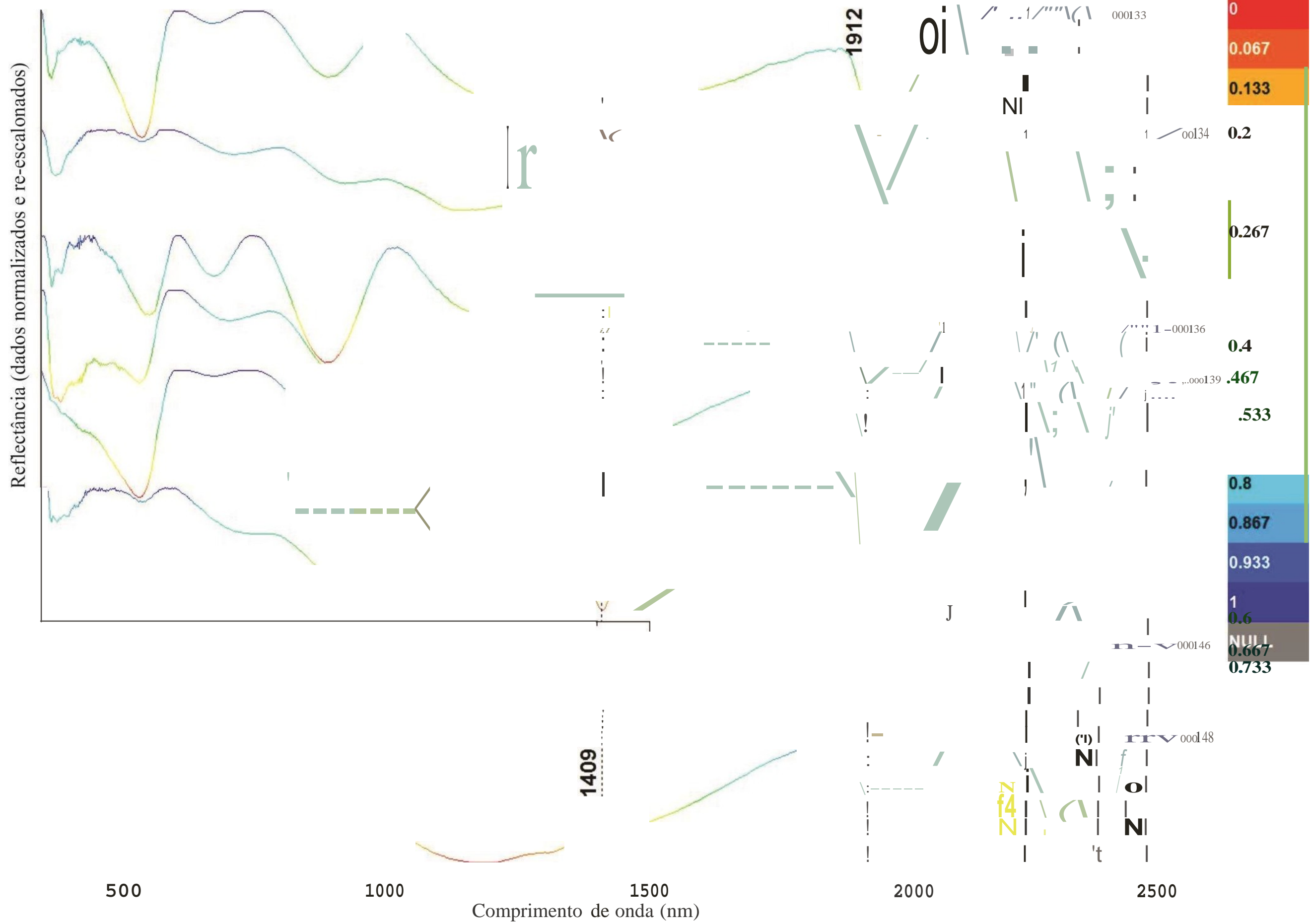


Espectros (t-reflectância)  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U7SR0277  
Minas do Camaquã

| Furo        | Prof (m) | Cod TSG | Minerais   |  |  |   |         |
|-------------|----------|---------|--|--|--|---|---------|
|             |          |         | Ilita Fengita (Ill Feng)<br>Feições Abs: 2210, 2347 e 2440 | Ilita Muscovita (Ill Ms)<br>Feições Abs: 2202, 2347 e 2440 | Clorita Ferro-Magnésiana (Chl_Fe_Mg)<br>Feições Abs: 2254 e 2347 | Hematita e Goetita<br>Feições Abs: VNIR (860 e 930) | Sulfeto |
| U7SR0277_01 | 74,15    | 000133  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Hematita/Goetita                                    |         |
| U7SR0277_01 | 74,15    | 000134  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita Goetita                                     |         |
| U7SR0277_01 | 74,15    | 000135  |  |  | Chl_Fe_Mg  | Hematita  |         |
| U7SR0277_02 | 96,08    | 000136  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_02 | 96,08    | 000137  |  |  |  |   | Sulfeto |
| U7SR0277_02 | 96,08    | 000138  |  |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita   |         |
| U7SR0277_02 | 96,08    | 000139  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita   |         |
| U7SR0277_03 | 120,50   | 000140  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_03 | 120,50   | 000141  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_03 | 120,50   | 000142  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_04 | 122,10   | 000143  |  |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita   |         |
| U7SR0277_04 | 122,10   | 000144  |  |  |  | Hematita  |         |
| U7SR0277_05 | 137,15   | 000145  |  |  | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_05 | 137,15   | 000146  |  | Ilita Ms   | Chl_Fe_Mg  |   |         |
| U7SR0277_06 | 161,40   | 000147  |  |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita   |         |
| U7SR0277_06 | 161,40   | 000148  | Ilita Feng   |  | Chl_Fe_Mg  | Goetita   |         |

Síntese Análise dos  
Espectros (reflectância)  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U7SR0277  
Minas do Camaquã

### Amostras de Testemunho de Sondagem com Ilita (U7SR0277)



Crustalinity (Ilita)  
Espectros (reflectância)  
Amostras de testemunho de  
sondagem  
U7SR0277  
Minas do Camaquã