

Estudo de assinaturas de reflectância de amostras de rocha do depósito de Au de Pedra Branca, região da Serra das Pipocas, CE

João Luís Carneiro Naletto ^{1,3}
Mônica Mazzini Perrotta ²
Carlos Roberto de Souza Filho ³

¹ CPRM - Serviço Geológico do Brasil – Residência de Fortaleza
Av. Antônio Sales, 1418 - 60135-101 – Fortaleza - CE, Brasil
joao.naletto@cprm.gov.br

² CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Superintendência Regional de São Paulo
Rua Costa, 55 – 01304-010, São Paulo - SP, Brasil
monica.perrotta@cprm.gov.br

³ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Instituto de Geociências (IG)
R. João Pandiá Calógeras, 51 - 13083-870 – Campinas - SP, Brasil
beto@ige.unicamp.br

Abstract. The Geological Survey of Brazil (CPRM) has been investigating the mineral resources potential of the Troia Massif, which is an Archean/Paleoproterozoic nucleus located at the central region of Ceará State. In this area, gold mineralization hosted by metavolcano-sedimentary sequences has been recently discovered by private exploration projects (Pedra Branca deposit). The gold is associated to quartz veins and hydrothermal alteration, hosted by amphibolites, metandesites, metatonalites and metasedimentary rocks, placed along a main NE-SW regional structure. In this context, a set of rock samples from the area were collected in order to study their compositional and physicochemical variations related to the hydrothermal alteration, through the extraction and analysis of their reflectance spectral signatures. The spectra of altered and fresh rocks samples were measured with an ASD FieldSpec-3 High-Resolution spectroradiometer and the mineralogical interpretations were performed visually, based on the GMEX and USGS reference spectral libraries. The results show a hydrothermal zonation consistent with orogenic gold deposits hosted by greenstone belts, defined by four main mineral assemblages: (i) amphiboles ± biotite ± epidote ± Mg-chlorite (“unaltered”), (ii) FeMg-chlorite ± calcite ± paragonite (distal, “chlorite zone”), (iii) ankerite/siderite ± muscovite ± calcite ± FeMg-chlorite (intermediate, “carbonate zone”), (iv) phengite ± ankerite/siderite (proximal, “muscovite zone”). The mineralogical model proposed is coherent with the geological and metallogenetic patterns defined by previous studies, which indicates its feasibility in prospecting new Au deposits in the region.

Palavras-chave: reflectance spectroscopy, orogenic gold, Troia Massif, espectroscopia de reflectância, ouro orogênico, Maciço de Troia.

1. Introdução

Projetos exploratórios recentes identificaram mineralizações de ouro em sequências metavulcanossedimentares paleoproterozoicas no entorno da Serra das Pipocas, região central do Estado do Ceará (depósito de Pedra Branca). Os trabalhos de prospecção foram conduzidos pela empresa canadense *Jaguar Mining*, a qual detém a totalidade dos direitos de exploração na área. Paralelamente aos projetos privados, o Serviço Geológico do Brasil - CPRM vem desenvolvendo atividades voltadas à avaliação do potencial mineral do Maciço de Troia, que corresponde ao núcleo arqueano/paleoproterozoico no qual se hospedam estas mineralizações (Costa et al. 2015a).

Neste contexto, análises espectroscópicas de amostras de rocha da área do depósito de Pedra Branca foram realizadas com objetivo de gerar informações acerca da composição e propriedades físico-químicas das assembleias minerais de alteração associadas ao minério e, a partir da integração com dados geológicos, propor um modelo espectro-mineralógico para o

depósito, útil na definição de novas áreas potenciais à ocorrência de mineralizações auríferas na região.

A Serra das Pipocas localiza-se entre os municípios de Pedra Branca, Independência, Boa Viagem e Tauá (CE) (Figura 1), e seu contexto geológico engloba sequências metavulcanossedimentares paleoproterozoicas (Complexo Troia) compostas por metaultramáficas, metavulcânicas básicas e intermediárias, biotita-xistos grafitosos, metacalcários impuros, quartzitos micáceos e metachertes com fácies sulfetadas e oxidadas. Intrusivos na sequência, ocorrem metaplutônicas máficas, metatonalitos e metaleucogranitos (Figura 1) (Costa et al. 2015a). Os depósitos de Au localizam-se em zona de cisalhamento regional de direção NE-SW, no contato entre as unidades de base e de topo da sequência. Nos principais alvos pesquisados, as zonas mineralizadas, com 2 a 5 metros de espessura em testemunhos de sondagem, compreendem veios de quartzo com sulfetos disseminados nos planos da foliação e localmente mobilizados ao longo de falhas rúptil-dúcteis. Em lâmina petrográfica, a alteração hidrotermal apresenta-se na forma de *patches*, contendo pirrotita e ouro associados a anfibólio, carbonato, biotita, diopsídio, feldspato potássico e titanita (Costa et al. 2015a).

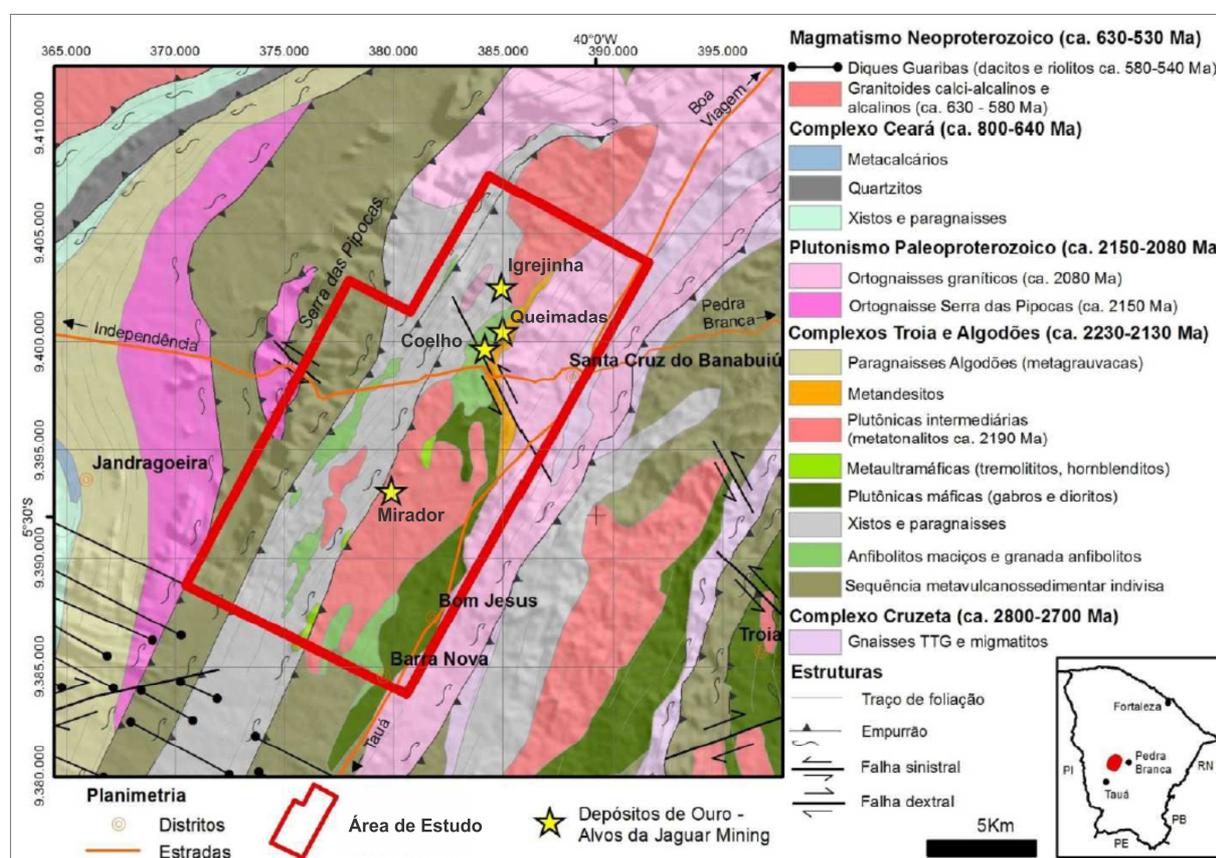


Figura 1 - Mapa geológico simplificado da região da Serra das Pipocas, com delimitação da área de estudo e localização dos principais alvos pesquisados pela *Jaguar Mining* (adaptado de Costa et al. 2015a).

2. Metodologia de Trabalho

Para a realização das análises espectroscópicas foram utilizadas 118 amostras de rocha, sendo 84 delas coletadas em afloramentos na área, 25 selecionadas de projetos antigos na litoteca da CPRM e 09 amostras de testemunhos de sondagem do alvo Coelho (Figura 1) cedidas pela *Jaguar Mining*.

As leituras foram realizadas no espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution*, com 2.101 bandas distribuídas entre os comprimentos de onda do visível-infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) (de 350 a 2.500 nm), com resolução espectral de 3 nm (em 700nm), 8,5 nm (em 1.400nm) e 6,5 nm (em 2.500nm). Para a tomada das medidas utilizou-se sonda de contato e cada amostra foi investigada nas suas variadas faces de acordo com o tipo (exposta, quebra natural ou serrada), grau de intemperismo, relação angular com a foliação e presença de heterogeneidades (veios e bandas). Este procedimento gerou um total de 408 espectros, registrados em valores de reflectância proporcional, relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa, do tipo *Spectralon*.

A interpretação mineralógica das assinaturas de reflectância foi realizada visualmente, a partir da análise da posição e geometria das feições de absorção, com base nas bibliotecas espectrais de referência do guia *GMEX - Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration* (Pontual et al. 2008a) e do *USGS - United States Geological Survey* (Clark et al. 2007).

Feições espectrais específicas nas assinaturas de alguns minerais foram analisadas com intuito de investigar tendências físico-químicas nos mesmos e suas relações com a mineralização. Mudanças na posição das absorções relacionadas a AlOH e FeOH foram utilizadas como parâmetro na investigação de variações composicionais nas micas brancas e cloritas, respectivamente. O grau de cristalinidade das caulinitas foi analisado pelo Índice Senna (de Senna et al. 2008) e pelo espaçamento entre as absorções em torno de 1.400 nm, enquanto que a substituição por Fe na estrutura deste mineral foi analisada pela profundidade da feição de absorção posicionada em 2.240 nm.

O modelo espectro-mineralógico foi definido a partir da integração dos resultados das análises espectroscópicas com dados geológicos prévios do depósito, e testado com base na comparação entre a espacialização das interpretações e os mapas geológico e geoquímico da área.

3. Resultados e Discussão

Os resultados da interpretação mineralógica dos dados de espectroscopia de reflectância indicam a ocorrência de assembleias hidrotermais consistentes com depósitos de ouro orogênico alojados em *greenstone belts* (e.g. Pontual et al. 2008b, Cudahy et al. 1995). Os minerais metamórficos identificados compreendem hornblenda, actinolita, tremolita, epidoto, biotita e clorita magnésiana, e as assembleias hidrotermais são representadas por clorita ferromagnésiana, carbonatos e micas brancas. Os minerais de intemperismo correspondem a caulinita, montmorilonita, nontronita e goethita.

Os minerais metamórficos apresentam feições de absorção principais posicionadas em comprimentos de onda que indicam vibrações moleculares relacionadas à ligação Mg-OH, em torno de 2.310 a 2.360 nm, e que, no caso de misturas espectrais, podem ocorrer sobrepostas, dificultando a interpretação. Assim, a hornblenda foi identificada pela feição secundária em torno de 2.390nm, o que a diferencia da actinolita e tremolita, além das feições principais destas em comprimentos de onda em torno de 6-8 nm mais curtos e com geometria dupla e aguda. O epidoto foi identificado pelas feições secundárias diagnósticas em 1.550 e 1.830 nm. A biotita e a clorita têm absorções que indicam também vibrações moleculares relacionadas à ligação Fe-OH, entre 2.240 e 2.260 nm. Nos espectros de biotita o pico de reflectância entre as absorções relacionadas a FeOH e MgOH se mostram mais altos em relação a linha do contínuo que nos espectros da clorita, a qual foi identificada também pela absorção assimétrica em torno de 2.000 nm, relacionada a H₂O.

A análise da variação composicional das cloritas (proporção Fe:Mg), mostrou como resultados termos magnésianos para as cloritas metamórficas, com feição relacionada a FeOH

posicionada entre 2.241 e 2.247 nm. Nas assembleias hidrotermais ocorrem cloritas de composição intermediária (ferromagnesianas), nas quais a absorção relacionada a FeOH posicionam-se entre 2.249 e 2.255 nm (Quadro 1).

Os carbonatos foram identificados pela geometria assimétrica da feição principal diagnóstica, típica deste grupo mineral (Pontual et al. 2008a). A calcita foi verificada pela posição desta feição entre 2.340 e 2.345 nm, enquanto que o carbonato de ferro (ankerita ou siderita) foi identificado por posições em torno de 2.335 nm, associadas a duas absorções amplas em 1.065 e 1.280 nm, típicas da presença de Fe²⁺ em carbonatos (Pontual et al. 2008a).

As micas brancas foram diagnosticadas pela feição de absorção principal relacionada à ligação Al-OH, associada a feições secundárias em torno de 1.410, 2.345 e 2.440 nm. A análise de suas variações composicionais indicou a ocorrência de paragonita (Na), com absorção principal em torno de 2.196 nm, muscovita (K), em torno de 2.200 nm, e fengita (Fe, Mg), em torno de 2.212 nm.

Montmorilonita e nontronita foram interpretadas pelas feições típicas de esmectitas, com absorções amplas e assimétricas em torno de 1.415 e 1.910 nm, e pelas posições das absorções relacionadas a AlOH, em torno de 2.203 nm para a montmorilonita e 2.296 nm para a nontronita. A goethita foi verificada por absorções diagnósticas posicionadas no VNIR, em torno de 650 e 920 nm. A caulinita foi identificada pelas absorções duplas nas bandas relacionadas a OH, em torno de 1.400 e 1.414 nm, e AlOH, em torno de 2.166 e 2.207 nm.

A comparação entre as paragêneses identificadas e a descrição petrográfica de amostras do testemunho de sondagem do alvo Coelho, realizada por Costa et al. (2015b), sugere a ocorrência de um zoneamento hidrotermal definido pela seguinte graduação de fácies, de acordo com o avanço progressivo em direção à zona mineralizada: (i) “metamorfismo regional”, (ii) “zona da clorita”, (iii) “zona do carbonato” e (iv) “zona da muscovita”. A transição entre a zona de metamorfismo regional (não alterada) e a zona da clorita (distal) é marcada pelo aumento na proporção Fe:Mg nas cloritas, que gradam para uma composição ferromagnesianas, e pela presença de paragonita ± calcita. A zona do carbonato (intermediária) é caracterizada pela ocorrência de carbonato de ferro ± muscovita ± calcita ± clorita ferromagnesianas e a paragênese característica da zona da muscovita (proximal) é definida por fengita ± carbonato de ferro.

Os resultados das análises de cristalinidade da caulinita apontam maiores valores do Índice Senna (1,182 a 1,238) e menor espaçamento entre as absorções da dupla em 1.400 nm (15 a 18 nm) nas amostras com presença de muscovita e fengita, indicando a ocorrência de caulinitas mais cristalinas associadas às paragêneses das zonas proximais de alteração hidrotermal (Quadro 2). Apenas nas amostras da zona da muscovita foi observada feição que indica a substituição por Fe na estrutura da caulinita.

A integração entre a espacialização das interpretações espectro-mineralógicas, realizada a partir da classificação das amostras de superfície de acordo com o modelo definido, e o mapa de anomalias geoquímicas (Lopez 2012) mostra concordância entre as zonas de alteração hidrotermal proximal e o *trend* de maior concentração de Au em solo. Na comparação com o mapa geológico da área (Costa et al. 2015a) as amostras alteradas para as zonas da muscovita e do carbonato concentram-se no contato entre metandesitos e anfíbolitos/granada anfíbolitos, junto ao alvo Coelho, ou ocorrem alinhadas a estruturas (fraturas, falhas e cavalgamentos) (Figura 2).

4. Conclusões

O estudo do comportamento espectral de amostras de rocha do depósito de Au de Pedra Branca permitiu a discriminação de quatro associações mineralógicas distintas, as quais, a

partir da integração com dados geológicos do depósito, indicaram a ocorrência de um zoneamento hidrotermal associado à mineralização. Minerais não descritos em estudos anteriores na área (micas brancas) foram identificados nas amostras. A análise de feições espectrais específicas indicou tendências composicionais e físico-químicas associadas à mineralização, tais como o aumento no teor de Fe nas cloritas, a composição tendendo a fengítica das micas brancas e o aumento da cristalinidade e substituição por Fe nas caulinitas, em direção às zonas proximais de alteração hidrotermal. O modelo espectro-mineralógico definido mostrou boa correlação com o padrão geológico-metalogenético da área, o que indica sua viabilidade na prospecção de novos depósitos de Au na região.

Quadro 1. Variação na posição das absorções relacionadas à ligação Fe-OH nas cloritas em relação ao zoneamento hidrotermal e paragêneses associadas. act = actinolita, FeMg cl = clorita ferromagnésiana, hbl = hornblenda, Mg cl = clorita magnésiana e trem = tremolita.

Amostras	Paragênese	Zoneamento	Posição absorção FeOH (nm)
FC-R-016	trem + Mg cl	metamorf. regional	2241
FC-R-048	hbl + Mg cl	metamorf. regional	2244
FC-R-185	act + Mg cl	metamorf. regional	2247
JN-R-082B	act + FeMg cl	zona da clorita	2249
FC-R-029-A	hbl + FeMg cl	zona da clorita	2250
FC-R-203	act + FeMg cl	zona da clorita	2250
FC-R-015	hbl + FeMg cl	zona da clorita	2251
FC-R-011	hbl + FeMg cl	zona da clorita	2252
FC-R-072	hbl + FeMg cl	zona da clorita	2252
FC-R-083	hbl + FeMg cl	zona da clorita	2253
FC-R-205	hbl + FeMg cl	zona do carbonato	2255

Quadro 2. Variação de cristalinidade da caulinita, definida pelo Índice Senna e pelo espaçamento entre as absorções da feição dupla em torno de 1.400 nm em relação ao zoneamento hidrotermal e paragêneses associadas. bt = biotita, ep = epidoto, FeMg cl = clorita ferromagnésiana, feng = fengita, hbl = hornblenda, kao = caulinita, ms = muscovita.

Amostras	Paragênese	Zoneamento	Índice Senna	Espaçamento absorções em 1.440 nm
FC-R-062	hbl + bt + kao	metamorf. regional	1,018	26
FC-R-093	hbl + bt + kao	metamorf. regional	1,035	26
FC-R-052	hbl + ep + kao	metamorf. regional	1,049	24
LF-R-389	bt+ kao	metamorf. regional	1,051	21
TR17a#03N	hbl + bt + kao	metamorf. regional	1,086	21
JN-R-082A	hbl + FeMg cl + kao	zona da clorita	1,047	22
LF-R-413	hbl + FeMg cl + kao	zona da clorita	1,095	16
FC-R-205	ms + kao	zona do carbonato	1,048	24
LF-R-365B	ms + kao	zona do carbonato	1,182	17
FC-R-126A	feng + kao	zona da muscovita	1,219	15
FC-R-055	feng + kao	zona da muscovita	1,238	18

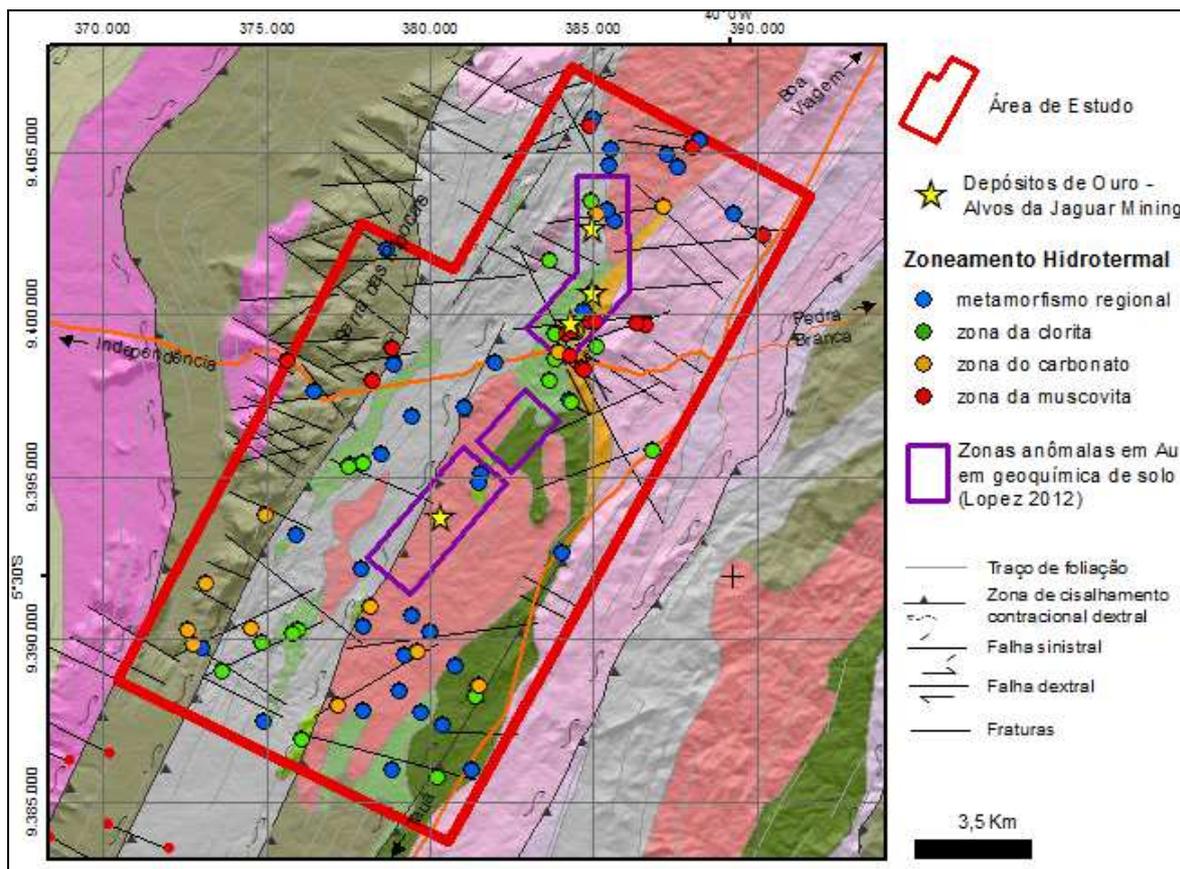


Figura 2 – Espacialização das interpretações espectro-mineralógicas sobre mapa geológico (modificado de Costa et al. 2015a), com indicação das zonas anômalas em ouro em geoquímica de solo (Lopez 2012).

Referências Bibliográficas

Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Wise, R.; Livo, E.; Hoefen, T.; Kokaly, R.; Sutley, S.J. USGS digital spectral library splib06a. U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.

Costa, F. G.; Palheta, E. S. M.; Calado, B. O.; Naletto, J. L. C.; Pinéo, T. R. G.; Lopes, A. P.; Martins, M. D.; Sousa, F. R. F. R. O. **Metalogenia das províncias minerais do Brasil: área Troia-Pedra Branca**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2015a. 51 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16411/Irm_PMB_02_Troia.pdf?sequence=3>. Acesso em: 12 nov. 2016.

Costa, F. G.; Naletto, J. L. C. **Geologia dos greenstone belts paleoproterozoicos da região de Troia e caracterização preliminar de suas mineralizações auríferas**. Fortaleza: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2015b. 42 p.

Cudahy, T. J.; Gray, D.; Phillips, R. N.; Wildman J. **Pilot spectral study of the Bronzewing gold deposit, western Australia**. North Ryde: CSIRO Division of Exploration and Mining, 1995. 106 p. (CSIRO/AMIRA Project P435). Disponível em: <<ftp://ftp.csiro.au/arrc/AMIRA%20P435%20Project%20Reports/Emr124r%20Bronzewing.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

de Senna, J. A.; Souza Filho, C. R.; Angélica, R. S. Characterization of clays used in the ceramic manufacturing industry by reflectance spectroscopy: An experiment in the São Simão ball-clay deposit, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 41, p. 85-98, 2008.

Lopez, J. M. **Programa de exploração mineral do grupo Jaguar Mining Inc**. Ouro Preto: V Simexmin, 2012. Disponível em < http://www.adimb.com.br/simexmin2012/wp-content/themes/simexmin/palestras/02%20-%20Programas%20Empresariais/III_5_Marc%20Lopez.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2016.



Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **Spectral interpretation field manual**. Spectral analysis guides for mineral exploration – GMEX. AusSpec International Ltd, v. 1, 2008a. 188 p.

Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. **Archean greenstone gold**. Spectral analysis guides for mineral exploration – GMEX. AusSpec International Ltd, v. 6, 2008b. 22 p.