

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Fabício Sousa da Silva

**Distribuição e contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita na região de
Espera Feliz, Minas Gerais/Espírito Santo**

Belo Horizonte
2015

FABRICIO SOUSA DA SILVA

**Distribuição e contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita na região de
Espera Feliz, Minas Gerais/Espírito Santo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof^o Dr.Fábio Soares de Oliveira

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG
2015

S586d
2015

Silva, Fabrício Sousa da.

Distribuição e contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita na região de Espera Feliz, Minas Gerais/Espírito Santo [manuscrito] / Fabrício Sousa da Silva. – 2015.

xiii, 82 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Fábio Soares de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2015.

Bibliografia: f. 57-60.

Inclui apêndice.

1. Prospecção mineral – Teses. 2. Sensoriamento remoto – Teses. 3. Mineralogia – Teses. 4. Espectroscopia de alta resolução – Teses. 5. Bauxita – Teses. 6. Minas Gerais – Teses. 7. Espírito Santo – Teses. I. Oliveira, Fábio Soares de. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 550.81(815.1/.2)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Distribuição e contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita na região de Espera Feliz, Minas Gerais/Espírito Santo

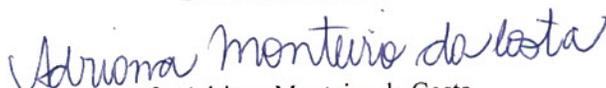
FABRICIO SOUSA DA SILVA

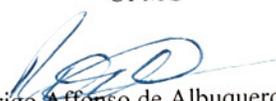
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 29 de abril de 2015, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Fabio Soares de Oliveira - Orientador
UFMG


Prof. Eliane de Paula Clemente Almeida
EMBRAPA SOLOS


Prof. Adriana Monteiro da Costa
UFMG


Prof. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega
UFMG

Belo Horizonte, 29 de abril de 2015.

“Pela fé compreendemos que, o Universo foi criado por intermédio da Palavra de Deus e que, aquilo que pode ser visto foi produzido a partir daquilo que não se vê”.

Hebreus 11:3

“Jesus, e em nenhum outro há salvação; porque debaixo do céu nenhum outro nome há, dado entre os homens, em que devamos ser salvos”

Atos 4:12

À Deus, meus Pais Pedro e Cléa, e minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, ao meu Majestoso Pai celestial, Deus, por ter me concedido a oportunidade de ingressar, não somente na Graduação em Geografia (na Universidade Federal do Maranhão em 2007) como também, no Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais aqui na Universidade Federal de Minas Gerais. Por ter me sustentado ao longo desses dois anos difíceis, longe de casa, dos amigos e, principalmente, por me dar a oportunidade de chegar a este momento. Obrigado Meu Deus, tú és bom!

Ao meu pai, O Pastor Pedro Leôncio e mãe, Cléa Gomes, por todo carinho dedicado a mim, pela força, incentivo, pelas orações durante os dias difíceis, alguns tristes e frios aqui em Belo Horizonte. À minha Irmã Fabíola Silva e meu cunhado Ribamar Júnior que, sempre torceram por mim e me acolheram nas noites chuvosas em que desembarquei em São Luís durante minhas férias. A meu sobrinho, João Filipe, por sempre me receber nas visitas em São Luís, sempre sorridente e disposto a brincar comigo. Minha amada família, sou grato.

À minha namorada e companheira Ana Karolina Carvalho, uma grande amiga que se tornou a mulher de Deus em minha vida. Bela que floresce em meio ao árido sertão, por sua paciência, por sua confiança, por ser uma mulher de honra e virtudes que amo, por acreditar em mim, por sonhamos sempre juntos, pelo seu apoio, pelos seus ouvidos sempre dispostos a me ouvir, por cuidar do meu coração e principalmente por amarmos a Deus incondicionalmente, sou grato.

À Igreja Batista do Céu Azul, em que me congreguei por dois anos, mais especialmente ao Paraense de sangue, e acreano de coração, Pastor Wellington Vulcão e toda sua família (Antônia e filhos: Felipe e Rebeca). Família do norte que conhece bem como é ser estrangeiro, agradeço a esta família por me receberem como filho, por fazerem sentir-me bem, mesmo estando tão longe de casa, pelos ensinamentos, conversas sobre o nosso Deus, sobre os nossos sonhos e nossas conquistas. Agradeço pelas orações que recebi, pelas tardes de domingo com almoços sempre saborosos quando sequer eu tinha o que comer e, por tudo o que aprendi quando estive sobre o seu pastoreio. À esta família sou imensamente grato.

À Dona Gerusa, dona da pensão que me acolheu ao longo desse tempo, pelos tantos bons momentos, pelo carinho, pelo auxílio nos momentos de enfermidade e por tantas boas tardes em que tomamos café e comemos queijo falando da bondade de Deus.

Aos queridíssimos amigos de república: Arteniza (eterna Lúh) com seus almoços salvadores e sua “baianidade” única; Fernanda Facirolli (Paulistinha) que nunca aprendeu a fazer café, mas que se mostrou companheira diversos momentos, como nas manhãs geladas e escuras em que viajei para as pesquisas e sempre se dispôs a me levar em sua motoca veloz, por trocarmos experiências sobre nosso Deus, sou grato; ao meu nobre companheiro Paulo Gouveia (Poul), um fantástico amigo que se tornou irmão em terras mineiras, pelo seu apoio, pelas conversas filosóficas, por termos feito da nossa casa um ambiente fantástico para se viver e um tempo que lembraremos para sempre, pelas tardes de sábado embalados ao som da viola e de músicas e paródias (que até hoje canto sozinho) que lembraremos para sempre. Pelos momentos difíceis e bons vividos na nossa república, sou grato.

Ao professor Fábio Soares, muito mais que um professor, um amigo que com toda sua simplicidade e experiência acadêmica me ajudou muito, motivou, acreditou em mim, um ser humano sensacional. Agradeço a sua gentileza e paciência comigo. Por ter acreditado neste trabalho e ter a certeza que eu “daria conta de encontrar as bauxitas de Espera Feliz” e por colhermos juntos os frutos de tal. Pela sua gigantesca preocupação para comigo, tanto como aluno quanto como ser humano, sou imensamente grato.

Ao Laboratório de Espectroscopia de Reflectância da Unicamp, na pessoa do Professor Carlos Roberto de Souza Filho, pela sua generosidade em me receber no Laboratório e, por pacientemente, me auxiliar na coleta, processamento das curvas espectrais e da imagem, além de ter cedido as imagens Aster para essa pesquisa.

À Ana Carolina Mateus, mestranda em Geologia/UFOP, que compartilhou comigo um pouco de seus conhecimentos científicos e experiências pessoais também. Pela sua força nas tarefas laboratoriais desenvolvidas nesta pesquisa, no DEGEO/UFOP, também pela gigantesca ajuda nos campos dessa dissertação. Por me ajudar a degustar bem a Tilápia, por partilhar comigo sonhos e me deixar ser seu amigo, sou grato.

A Mineração Santo Expedito e EDEM Projetos por disponibilizar informações técnicas referentes à área que possibilitaram, entre tantas ações, a escolha da área de estudo. Também ao Venilson, funcionário da Sto Expedito por dedicar seu tempo na realização dos campos dessa dissertação, por me ajudar com a logística e também com as perfurações debaixo do sol escaldante do verão mineiro.

Aos meus queridíssimos amigos de turma: começando por ela, Glória Ramos, grande amiga que me auxiliou em momentos muito difíceis, quando a saudade e a

solidão eram constantes, pelas brigas e pela motivação de sempre, por me deixar aprender com você e por puxar minha orelha; minha amiga Camila Ragonezzi (Se acalme Senhora!), ou simplesmente “Camilão”, pela ajuda diária nas caronas para ir ao Campus, por muitas vezes cobrir minhas refeições e por tantos bons momentos em que rimos e que nos desesperamos; aos meus dois estimadíssimos companheiros Jorge Luís (e os morceguinhos de BH) e André Silveira (e o fogo na Amazônia), por sempre contribuírem comigo enquanto profissional e amigo, por sempre estarem juntos com toda a turma, motivando e repassando o conhecimento; a minha amiga Laylla, por sempre me fazer sorrir e me ensinar que a vida pode ser levada a sério, mas não tão sério; aos demais companheiros: Tereza Bernardes (eterna Tati), Mariana Sena (Ralada!), Patrícia Gomes (Paty e o seu maravilhoso queijo da Roça, oh delícia!), Carolina Lima, ao Bernardo e ao Daniel Mamede (o único que compreendeu o funcionamento da “vasilha laranja”) e o Robson (sempre dando um “jeitinho mineiro”).

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, a todos, mas em especial aos que contribuíram diretamente com minha passagem pelo IGC: Professor Marcos Timbó por suas pacientes e importantes aulas de Sensoriamento Remoto, Professor Rodrigo Nóbrega por sempre ter tempo para ouvir minhas dúvidas, as professoras Márcia e Úrsula por depositarem confiança em mim na condução dos trabalhos de monitoria na Especialização em Geoprocessamento. Também a Secretária do Programa Pâmela, por sua simpatia e paciência ao me receber e atender minhas solicitações na coordenação do Programa.

Aos meus amigos maranhenses do Núcleo de Geotecnologias e Análise Espacial (GEOPRO/UFMA), professor Maurício Rangel e Ricardo Almeida, os quais me proporcionaram a oportunidade de seguir por esse caminho.

A Isabela Oliveira, companheira de graduação que se tornou minha amiga. Agradeço nossas conversas e também seu apoio nos momentos difíceis longe do Maranhão.

Aos amigos do Mestrado em Geografia da Universidade Federal do Piauí, pela parceria e experiências trocadas ao longo desses anos. Agradeço especialmente aos amigos Antônio Carlos e Roneide Sousa.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos que contribuiu nas minhas despesas de moradia e alimentação em Belo Horizonte.

A FAPEMIG pelo custeio financeiro de todas as atividades ligadas a essa pesquisa, principalmente as atividades de campo realizado na região de Espera Feliz e o deslocamento para estudos na Unicamp.

À fantástica e inesquecível Belo Horizonte, cidade maravilhosa de povo acolhedor, do pão de queijo, do Cruzeiro, do Atlético, do América e tantas maravilhas que vão de suas tortuosas ladeiras a sua poesia.

Ao meu Maranhão, minha São Luís, minha terra, meu chão.

A todos que direta ou indiretamente cooperaram para este momento.

RESUMO

Este trabalho realizou uma caracterização geológico-geomorfológica das ocorrências bauxíticas na divisa sul dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, na região compreendida como Espera Feliz, nas proximidades da Serra do Caparaó, a partir de dados multiespectrais do Sensor Aster, Difração de Raios-X e espectroscopia. A técnica de Classificação SAM (Spectral Angler Mapper) foi aplicada, a partir de curvas espectroscópicas referenciais de 5 pontos de bauxita coletados na área, às 9 bandas do Sensor Aster para espacialização de ocorrências. A difração por Raios-X evidenciou a presença dos seguintes minerais constituintes da bauxita local: Gibbsita, Caulinita, Hematita, Goethita, Água e Quartzito identificados também em seus pontos de absorção espectroscópicos os quais demonstram ainda a existência de um diferenciado nível de degradação entre as amostras coletadas em campo. A degradação relaciona-se principalmente com meio geomorfológico em que estão alocadas. Os resultados obtidos na classificação SAM distribuíram-se sobre todos os compartimentos geológicos da região e, após trabalho de campo, verificaram-se a relação de ocorrências bauxíticas como sendo associadas principalmente as formações geológicas da região do Caparaó, a saber: Ortognaisses da Suíte Caparaó e Granitos, uma vez que se mostram mais proeminentes na gênese bauxítica, como demonstram pesquisas anteriores. A mineralogia essencial da bauxita foi confirmada tanto espectral quanto mineralogicamente, confirmando assim a consonância entre as técnicas na caracterização mineral e servindo de subsídios na identificação da ocorrência espacial desses minerais aluminosos a partir de imagens orbitais.

Palavras-chave: Prospecção Mineral, Sensoriamento Remoto, Mineralogia e Espectroscopia.

ABSTRACT

This work conducted a geological and geomorphological characterization of bauxíticas occurrences in the southern border of the states of Minas Gerais and Espírito Santo, in the region understood as Espera Feliz, near the Serra do Caparaó from multispectral data Aster sensor, diffraction-rays X and spectroscopy. The SAM classification technique (Spectral Angler Mapper) was applied from spectroscopic reference curves of 5 bauxite points collected in area at 9 bands of Aster sensor for occurrences of spatial. The X-ray diffraction showed the presence of the following mineral constituents of the local bauxite: Gibbsite, Kaolinite, Hematite, Goethite, Water and Quartz identified also in their points of spectroscopic absorption which further demonstrates the existence of a differentiated level of degradation between samples collected in the field. The degradation is related mainly with geomorphological medium in which they are allocated. The results in the classification SAM were distributed on all geological compartments of the region and, after fieldwork, mostly there were the relationship of bauxíticas occurrences as being associated with the geological formations of the Caparaó region, namely: orthogneisses the suite Caparaó and Granite, as are most prominent in the genesis bauxitic, as shown by previous research. The essential mineralogy of bauxite was confirmed both spectral as mineralogically, thus confirming the line between techniques in mineral characterization and serving subsidies in identifying the spatial occurrence of aluminous minerals from orbital images.

Keywords: Mineral Prospecting, Remote Sensing, Mineralogy and Spectroscopy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	3
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1.1 Introdução.....	3
1.2 Objetivos Gerais e Específicos	5
1.3 Localização da área de estudo	5
CAPÍTULO 2	7
CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA.....	7
2.1 Geologia	7
2.2 Geomorfologia.....	9
2.3 Pedologia	11
2.4 Cobertura Vegetal.....	12
CAPÍTULO 3	14
BAUXITA: HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE	14
3.1 Bauxita: gênese e tipologia.....	14
3.1.1 Gênese de Depósitos Cársticos.....	15
3.1.2 Gênese de Depósitos Lateríticos	16
3.1.3 Gênese de Depósitos Sedimentares	19
3.2 A bauxita no Brasil e no mundo	19
3.3 A bauxita na Região de Espera Feliz.....	21
CAPÍTULO 4	22
MINERALOGIA E SENSORIAMENTO REMOTO.....	22
4.1 O Sensoriamento Remoto e sua aplicação na prospecção mineral.....	22
4.2 Fatores importantes para uso do Sensoriamento Remoto nas investigações geológicas	23
4.3 Sensor Aster.....	25
4.4 O uso da biblioteca espectral para a prospecção de Bauxita	26
CAPÍTULO 5	32
MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5.1 Introdução.....	32
5.2 Pesquisa de gabinete: pré-campo.....	33
5.3 Trabalho de campo 1: reconhecimento e coletas.....	33
5.4 Análises laboratoriais	36

5.4.1 Difração de Raios-X	36
5.4.2 Espectroscopia de Reflectância e criação da Biblioteca Espectral.....	37
5.5. Processamento Digital de Imagem e Classificação Supervisionada	38
5.5 Trabalho de campo 2: validação da classificação.....	40
CAPÍTULO 6	41
RESULTADOS	41
6.1 Caracterização mineralógica e espectroscópica dos materiais coletados	41
6.2 Distribuição espacial da bauxita	45
CAPÍTULO 7	49
DISCUSSÕES	49
7.1 Contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita.....	49
7.2 Inserção das ocorrências identificadas em Espera Feliz na escala regional	52
CAPÍTULO 8	55
CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS	61
SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO DA BAUXITA NA REGIÃO DE ESPERA FELIZ (MG/ES)	62

APRESENTAÇÃO

Este trabalho apresenta o estudo referente à distribuição das ocorrências de bauxita na região de Espera Feliz, de tal modo que, a fundamentação teórica, os procedimentos e os resultados alcançados estão estruturados da seguinte forma:

- **CAPÍTULO 1:** Apresenta a introdução do tema abordado, contextualizando-o de modo geral e expondo os principais norteadores dessa pesquisa.

- **CAPÍTULO 2:** Discorre sobre a configuração paisagística geral da área de estudo, apresentando os principais elementos a serem relacionados com a formação da bauxita local.

- **CAPÍTULO 3:** É composto pela fundamentação teórica que norteia a elaboração do trabalho, iniciando a discussão a partir do *estado da arte* sobre as bauxitas de um modo geral, abordando ainda as bauxitas brasileiras e por fim caracterizando as bauxitas da região de estudo.

- **CAPÍTULO 4:** Expõe as principais contribuições do sensoriamento remoto para investigação mineralógica, enfatizando também suas metodologias de aplicação, com destaque para as principais aplicações mais recentes no Brasil.

- **CAPÍTULO 5:** Apresenta os métodos utilizados durante a pesquisa. Ressalta-se que, como os resultados estão apresentados na forma de artigo científico (no capítulo 6), fez-se necessário a discussão desses métodos em um capítulo que pudesse contemplar especificamente estes procedimentos e os materiais utilizados de uma forma ampla.

- **Capítulos CAPÍTULO 6 e CAPÍTULO 7:** Expõe os resultados e discussões do trabalho, apresentando as contribuições da detecção dessas ocorrências bauxíticas a partir de curvas espectrais, análises espectroscópicas e mineralógicas, além da associação geológica-geomorfológica dessas ocorrências.

- **CAPÍTULO 8:** Apresenta, de modo conciso, as conclusões obtidas neste trabalho e as contribuições deste para as investigações mineralógicas de uma forma geral.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

As primeiras pesquisas sobre bauxitas datam do período de sua descoberta na região de Leus Baux, França, no ano de 1829 (GORDON, 1958). Até essa descoberta, apenas hipoteticamente havia a especulação sobre a existência de rochas com elevado teor de alumínio.

Bauxitas são produtos do intemperismo de rochas aluminossilicáticas, sendo o alumínio, elemento de menor mobilidade, acumulado lentamente ao longo de milhares de anos. As condições climáticas tropicais são favoráveis à ocorrência de bauxitas por proporcionar temperatura e umidade em quantidade e intensidade favoráveis ao avanço dos processos de alteração intempérica. Por consequência, as bauxitas se caracterizam por uma paragênese mineral secundária, contendo prioritariamente, gibbsita, além de alguns minerais considerados impurezas, como compostos de ferro (hematita, goethita) óxidos de titânio e quartzo (VARAJÃO E MENEZES, 1988).

As bauxitas possuem origens distintas, mas composições mineralógicas geralmente semelhantes. A classificação dos tipos de bauxita existentes pode ser feita de acordo com sua origem, considerando, de acordo Lelong (1976) *apud* Carvalho (1989) e Bigarela et al. (1996), aspectos relacionados à morfologia do depósito e aspectos associados à gênese. Tal classificação resulta em três tipos distintos de bauxita: Lateríticas, Sedimentares e Cársticas.

A maioria dos depósitos do planeta é do tipo laterítico (88%). Os depósitos cársticos representam cerca de 11,5% e os sedimentares aproximadamente 0,5% (MEYER, 2004). Depósitos de bauxita localizam-se principalmente em regiões tropicais e intertropicais, como é o caso do Brasil (com destaque para região amazônica, centro-oeste, Lages-SC e Região Sudeste), Filipinas, Índia e Estados Unidos (BIGARELA ET AL., 1996).

No ano de 2011, a produção mundial de alumina atingiu a ordem dos 26 bilhões de toneladas, sendo 567 milhões produzida no Brasil (DNPN, 2012). Desse total, 96% é utilizado em processos de beneficiamento metalúrgico.

Os procedimentos para que seja instalado um novo pólo mineral de bauxita compreende diversos levantamentos técnicos que, no Brasil, são gerenciados pelo

Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A CPRM considera duas etapas iniciais: i) avaliação geológica da área e, ii) produção de confiável número de informações (mapas e seções geológicas suportadas por sondas), perfis geofísicos, amostragens e outros, que constituem a prospecção e dimensionamentos das ocorrências.

A prospecção, ou exploração, trata da coleta, processamento das informações e identificação do potencial da área para exploração (retirada), de forma preliminar, diminuindo a possibilidade de investimentos errôneos. Nesse contexto, áreas do conhecimento tecnológico como o sensoriamento remoto e a modelagem de distribuição figuram como ferramentas que auxiliam para esses fins, basicamente por dois motivos: a abrangência com a qual os dados são trabalhados e o tempo de resposta entre a pesquisa e a tomada de decisão.

Rocha e Souza Filho (2013) e Crósta (1993) demonstraram o potencial do sensoriamento remoto na identificação de características mineralógicas de formações superficiais. Os autores concluíram que se trata de uma ferramenta com boa relação custo-benefício, uma vez que os dados obtidos remotamente por sensores multiespectrais e de moderada resolução espacial, como o Landsat e o ASTER, tem oferecido resultados satisfatórios. No mesmo sentido, Breuning et al. (2009) expõe que o sensoriamento remoto é passível de ser utilizado na identificação mineral, pois minérios presentes em rochas, como a bauxita, exibem bandas de absorção bem definidas no visível, infravermelho próximo (Visible/Near Infrared – VNIR) (goethita e hematita) e no infravermelho de ondas curtas (Shortwave Infrared – SWIR) (caulinita e gibbsita).

A Região de Espera Feliz, compreendida nos limites entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, apresenta a ocorrência de dispersas concentrações bauxíticas, o que tem suscitado a pesquisa e sondagem do potencial mineralógico regional. Estudos realizados por Soares (2013) identificaram espécies associadas à alteração de rochas do Complexo Juiz de Fora, sobretudo charno-enderbitos. Cidades como Cataguases e Itamarati de Minas (ambas no estado de Minas Gerais) associam-se à Espera Feliz por estarem contidas num cinturão aluminoso de orientação NE-SW (ROMANO E CASTAÑEDA, 2006), que se estende de São João Nepomuceno-MG até o Espírito Santo. Nessas localidades já ocorrem empreendimentos minerários, responsáveis pela terceira maior exploração de minério de alumínio do Brasil.

Embora verificada sua ocorrência, os depósitos da região de Espera Feliz não são amplamente conhecidos. Isso porque, em conformidade com o que acontece em demais áreas da Zona da Mata e Leste Mineiro, esses depósitos encontram-se compartimentados na paisagem, possivelmente situados em topos residuais entre as altitudes de 800 e 1000 metros (LOPES, 1987). Assim, a identificação da distribuição e compartimentação da bauxita nessa região, considerando a importância da prospecção de novas ocorrências e da contribuição que o sensoriamento remoto pode trazer, orientou a realização deste estudo. Como resultado final, buscou-se a relação dos depósitos com o contexto geológico-geomorfológico que ocorrem, de maneira a contribuir não apenas com a academia científica, como também com a geração de informações aplicáveis ao crescimento econômico da região investigada.

1.2 Objetivos Gerais e Específicos

Este estudo objetivou investigar como estão distribuídas as ocorrências de bauxita na região de Espera Feliz, considerando também sua relação com o contexto geológico-geomorfológico.

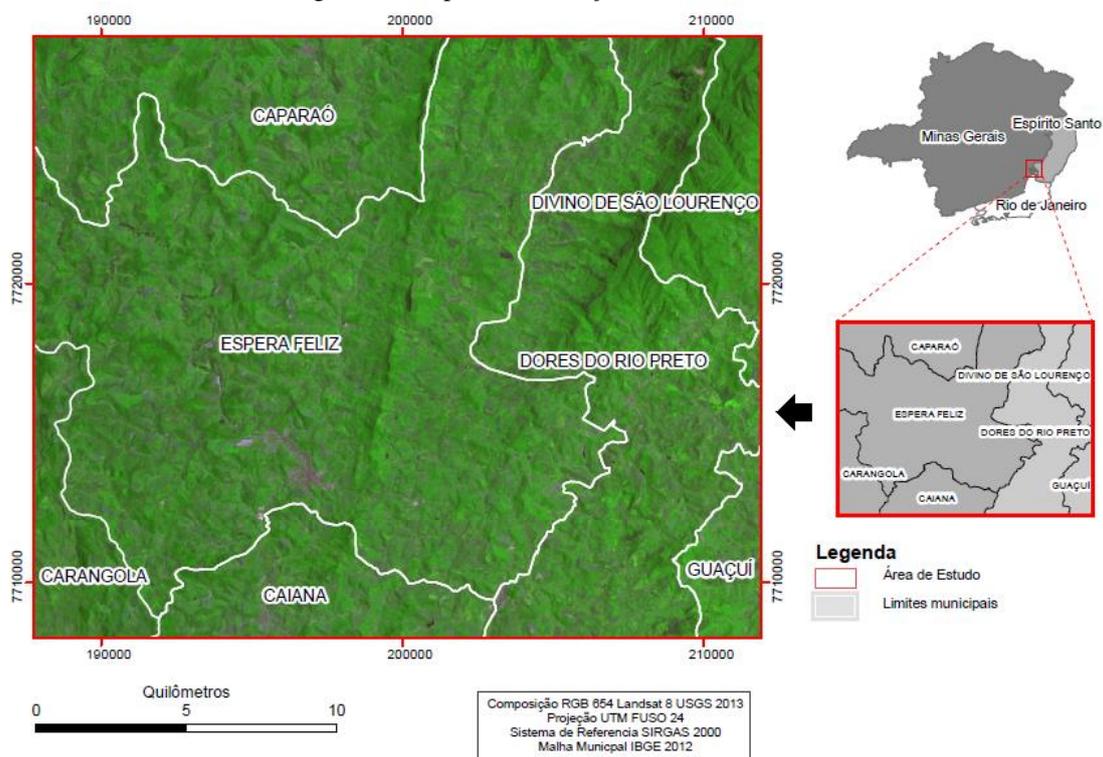
A especificidade desse estudo reside em:

- ❖ Identificar as assinaturas espectrais da diversidade bauxítica na região;
- ❖ Gerar uma biblioteca espectral para classificação na cena Aster via Algoritmo SAM (*Spectral Angle Mapper*);
- ❖ Relacionar o comportamento espectral dos tipos bauxíticos e sua composição mineralógica;
- ❖ Compreender a associação entre o contexto geológico-geomorfológico e a distribuição das bauxitas.

1.3 Localização da área de estudo

Espera Feliz está localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, ao sul da Serra do Caparaó. A área delimitada para pesquisa é composta pelos municípios de Espera Feliz, Caparaó e parte dos municípios de Caiana e Carangola na porção mineira. Os municípios de Dores do Rio Preto e partes de Divino São Lourenço e Guaçuí compõem a porção capixaba da área de estudo. A região foi delimitada com base na da Folha geológica SF.24-V-A-IV – Espera Feliz (CPRM, 2007) na escala de 1:100.000, sendo compreendida pelas coordenadas 188000mE e 212000 mE e 7728000 mN e 7708000mN (Figura 1).

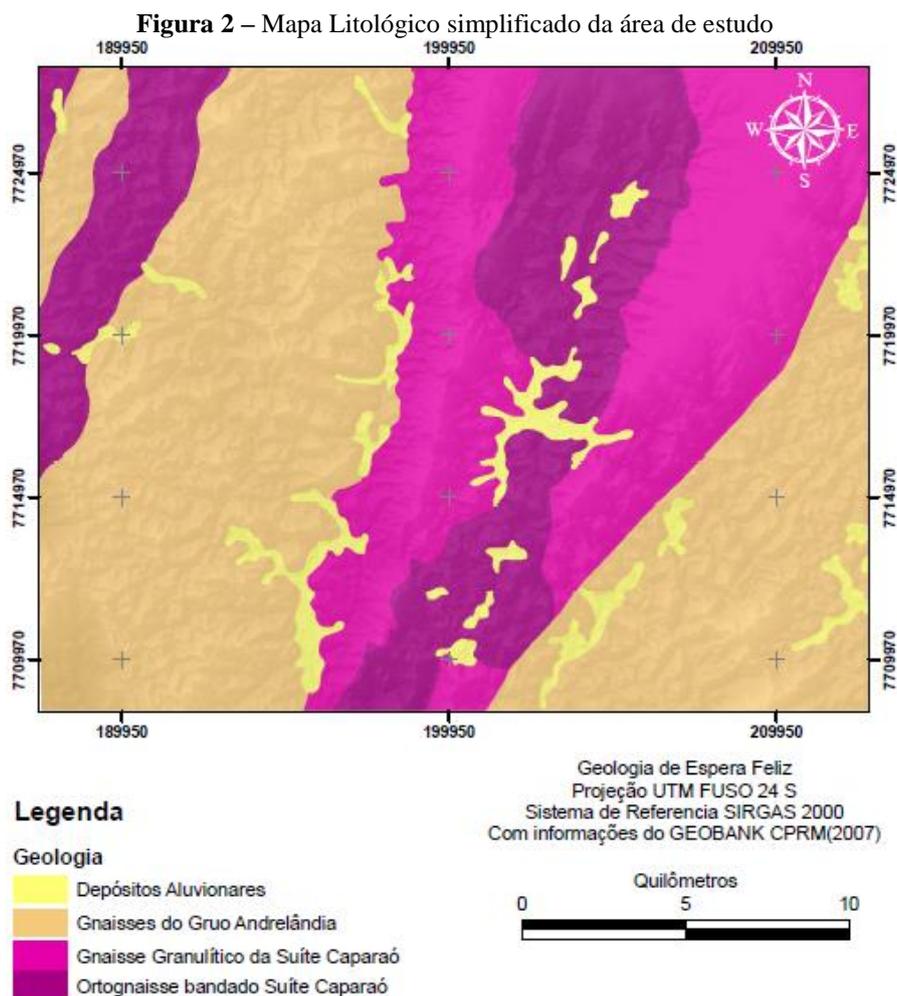
Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

2.1 Geologia

A região de Espera Feliz localiza-se na Província Estrutural Mantiqueira; um sistema orogénico com sentido preferencial NE-SW, em que há grandes zonas de cisalhamento presentes. Dentro da província Mantiqueira ocorrem os orógenos Dom Feliciano, São Gabriel, Araçuaí e Ribeira, sendo que na transição entre os dois últimos se insere a área investigada. São reconhecidas na área de estudo unidades litológicas pertencentes ao Proterozóico e Paleoproterozóico, respectivamente, a Suíte Caparaó inserida no Complexo Juiz de Fora, e o Grupo Andrelândia. Além dessas unidades, ainda há a ocorrência de formações do Neógeno, representadas pela existência de pequenos depósitos aluvionares (Figura 2).



Fonte: Adaptado de Horn et al. (2007) por Silva (2014).

Segundo Horn et al. (2007) e Novo et al. (2001), a Suíte Caparaó apresenta rochas de composição enderbítica, charnockítica, quartzodiorítica, gabróica e norítica. Genericamente, o principal litótipo é um gnaiss ortoderivado, bandado, com granulação média a fina e com textura granoblástica (Figura 3). Esses gnaisses apresentam bandamento preferencial NNE e enclaves máficos em que são verificados plagioclásios, ortopiroxênios e clinopiroxênios. Tanto os bandamentos quando os enclaves ocorrem em fácies granulito. Tal litologia é resultado, principalmente, da remobilização das rochas do Complexo Juiz de Fora, com uma pequena inserção dos sedimentos provenientes do Grupo Andrelândia, fatores que cooperam para a ampla variedade petrográfica.

Figura 3– Afloramento de rochas charnokíticas em área de influencia da Suíte Caparaó.



O Grupo Andrelândia foi recentemente classificado nesta região por Horn et al. (2007). Até 2004, esta mesma unidade era considerada como sendo parte do Complexo Paraíba do Sul. Somente a partir do mapeamento regional de detalhe, na escala de 1:50.000, é que se tornou possível identificar a presença dessa unidade. O Grupo Andrelândia localiza-se na borda leste do estado de Minas Gerais em sua divisa com o Espírito Santo, onde se insere nas macro-faixas orogenéticas de Araçuaí e Ribeira. Na área de estudo, este grupo localiza-se principalmente ao redor da Serra do Caparaó, caracterizando-se pela presença de paragnais granatíferos e muscovíticos, ou quartzíticos, sendo estes, por vezes, migmatizados ou milionitizados.

Os depósitos aluvionares, de suposta idade holocênica, ocupam as posições mais baixas do relevo, como os vales dos rios e riachos, além das planícies mais extensas da região. Esses depósitos foram interpretados como sendo do tipo fluvial *in situ*, dotados de características que vão de arenosas a argilosas nos quais ocorrem lentes de cascalho

moldando as curvas dos rios. Horn et al. (2007) observaram a oeste da Serra do Caparaó atividade garimpeira nos pegmatitos (caulim, mica). Outra extração realizada na região é a de areia e cascalho para construção civil, ocorrendo nos rios de maior vazão e, por conseguinte, maior deposição sedimentar.

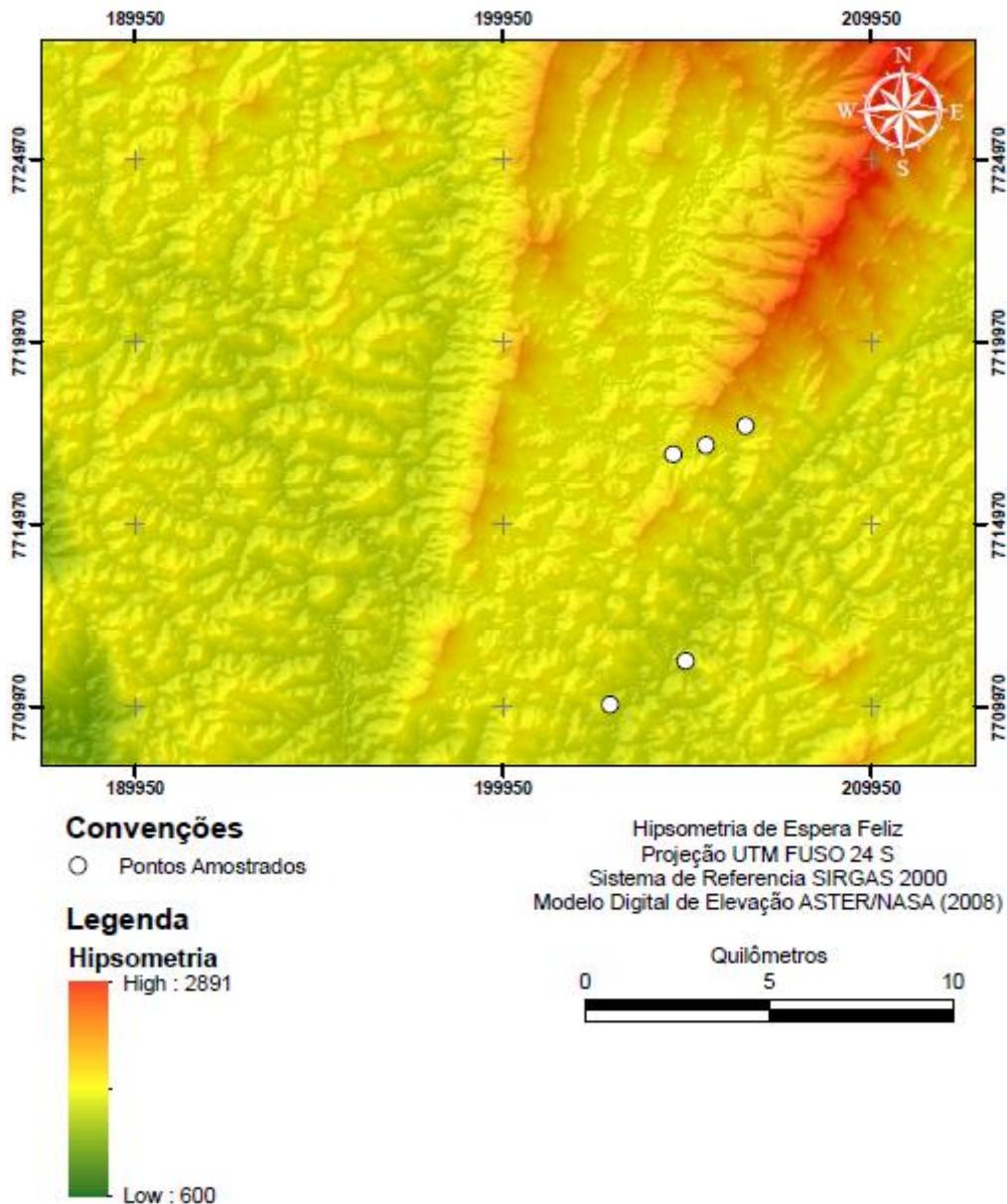
Em se tratando das rochas geradas pelo enriquecimento supergênico (as bauxitas), a área de estudo é parte do cinturão aluminoso reportado na literatura desde a década de 1980 (BRANQUINHO E LOPES, 1988), com reservas já exploradas, como os depósitos de Mirai e Cataguases. As ocorrências são consideradas espacialmente moderadas, sobretudo quando comparadas com os gigantescos depósitos da região amazônica (MELFI, 1997). Na área de estudo, os trabalhos de descoberta e caracterização de depósitos são escassos, destacando apenas alguns estudos petrogenéticos, como aquele realizado por Soares (2013). Nesse estudo, a autora identificou que a rocha formadora da bauxita local é um gnaisse granulítico charnokítico, denominado charno-enderbitó, com inclusões máficas, diretamente relacionado à litologia da Suíte Caparaó. Através do estudo de exposições em perfis, constatou-se que, a gênese e evolução da bauxita ocorrem através das seguintes fácies de alteração: isalterítica caulinítica, bauxita isalterítica, bauxita laminar e bauxita fragmentada.

2.2 Geomorfologia

A Geomorfologia da área é marcada por um forte controle estrutural no qual há a presença de serras alongadas e espigões seguindo, conforme Soares (2013), a direção NNE-SSW das rochas. De acordo com Horn et al. (2007), a localidade apresenta cotas com padrões que variam de 800 a 1100m, tendo a quebra do padrão estrutural no pico da Bandeira, já no Caparaó, onde a altura máxima é de 2891m (Figura 4).

Em relação às formas de relevo, observa-se a existência de morrotes convexizados (Figuras 5a e 5b), nos quais ocorrem depressões fechadas ou com diferentes níveis de abertura, semelhantes a anfiteatros (OLIVEIRA, 2013). Estudos recentes têm investigado a gênese dessas depressões, especulando-se que, ao contrário do que foi demonstrado em outras áreas do sudeste brasileiro (FILIZOLA E BOULET, 1982), nessa região as depressões teriam sua gênese associada a movimentos de massa nas vertentes, impulsionados por reativações neotectônicas. De outra maneira, tais feições sempre foram interpretadas como produto da alteração diferencial de rochas seguindo lineamentos estruturais de ordem regional.

Figura 4 –Hipsometria da região obtida a partir de Modelo Digital de Elevação Aster.



Fonte: ASTER, NASA. Adaptado por Silva (2014).

Os morrotes são separados entre si por vales entulhados de sedimentos, com morfologia aplainada. Nesses vales ocorrem terraços fluviais e planícies de inundação, serpenteadas por rios meandantes, conforme identificado por Soares (2013) (Figura 5a). Como os padrões morfológicos dos canais respondem à dinâmica de interação desses com o substrato e às características do próprio canal, em algumas porções dos vales os canais meandantes tornam-se mais retilíneos, possuindo zonas de corredeiras e encachoeiramentos. Essa mudança é um importante aspecto para demonstrar a possibilidade de que soerguimentos recentes tenham afetado a morfoestrutura dessa

região e de que existam estruturas controlando seções determinadas dos rios (SOARES, 2013). Dentre essas corredeiras, merece destaque o rio Dores, ao sul do Caparaó, que também é uma divisa natural entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Figura 5 – (A) Visão geral da geomorfologia da região. Destaque para a presença de morrotes e o Rio Dores. (B) Detalhamento de um morrote convexizado com sutil depressão na porção superior do topo.



2.3 Pedologia

A região de Espera Feliz apresenta um mosaico diversificado de solos, incluindo desde solos de coloração vermelho-amarelada, produto da atuação intensa de processos de intemperismo e pedogênese, até solos rasos, entremeados por afloramentos rochosos. De acordo com a FEAM/UFV/UFLA (2010) e Pacheco (2011), ocorrem na área as classes LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, NEOSSOLO LITÓLICO, CAMBISSOLO HÁPLICO, GLEISSOLO HÁPLICO e NEOSSOLO FLÚVICO.

O LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO recobre a maior parte da área de estudo, estendendo-se de leste a oeste e principalmente de norte a sul, em áreas de relevo plano a ondulado. Estudos recentes (OLIVEIRA ET AL., 2015 – comunicação oral) apontam que tal solo possui comportamento morfológico e mineralógico que os relacionam com a degradação da bauxita. Uma dessas características é, além de sua profundidade, a presença de fragmentos de bauxita em profundidade, a presença de caulinita neoformada a partir da degradação da gibbsita, o amplo predomínio de goethita em relação à hematita, e teores de sílica que não condizem com uma herança litológica, mas com uma ciclagem biogeoquímica.

O LATOSSOLO VERMELHO ocupa apenas uma pequena faixa na porção sudoeste da área de estudo, ao norte do município de Carangola. Este solo apresenta a cor vermelha em razão do predomínio de hematita na mineralogia oxidada, são

profundos e ocorrem em áreas de relevo forte ondulado e montanhoso. É provável que sua gênese esteja associada a enclaves de rochas máficas.

O CAMBISSOLO HÁPLICO e o NEOSSOLO LITÓLICO ocorrem em faixas restritas da área de estudo, sobretudo em áreas de relevo montanhoso, ou de rochas muito resistentes, como pequenas lentes de quartzito. Trata-se de solos jovens, pouco profundos, com quantidades elevadas de minerais primários facilmente intemperizáveis, sendo, geralmente, muito siltosos. A presença do silte e a pouca profundidade desses solos caracterizam sua baixa permeabilidade.

Tanto o GLEISSOLO HÁPLICO quanto o NEOSSOLO FLÚVICO ocorrem em áreas de baixadas, próximos aos canais fluviais. Os GLEISSOLOS predominam em setores com meandros abandonados e lagoas marginais associadas às condições de hidromorfia. Os NEOSSOLOS FLÚVICOS estão relacionados a pacotes remobilizados de sedimentos nas bordas dos canais. Muitas vezes esses sedimentos são representados por knick points próximos de zonas de corredeiras e cachoeiras.

2.4 Cobertura Vegetal

De acordo com o Sistema Fisionômico-Ecológico proposto por IBGE (2012), a cobertura da vegetação local é, de sobremodo, homogênea e corresponde a uma área de Floresta Ombrófila Densa Montana, resquício do bioma Mata Atlântica, denominada no Estado de Minas Gerais, em sua borda leste, como Zona da Mata Mineira. Essa cobertura também rodeia a porção oeste do Espírito Santo e recobre o extremo noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Trata-se, sobretudo, de formações florestais caracterizadas por estarem situadas no alto dos planaltos e das serras entre 600 e 2 000 m de altitude. A estrutura florestal possui dossel uniforme com altura em torno de 20 m e relativamente fino, com casca grossa e rugosa. As folhas apresentam tamanhos miúdos e de consistência coriácea, além de fácil quebra (Figura 6).

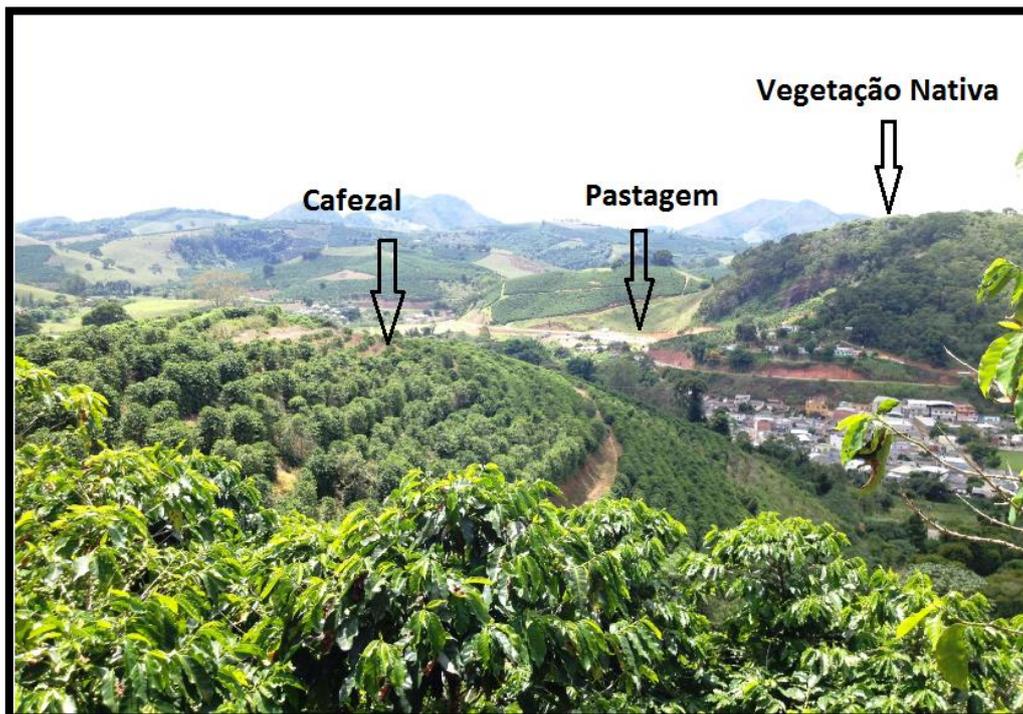
A vegetação da região de Espera Feliz foi, em grande parte, removida com exceção de pequenas áreas das quais mantem-se intactas reservas particulares e reservas estaduais ou nacionais, como o Parque Nacional da Serra do Caparaó. Horn et. al (2007) identificou que as principais atividades antrópicas que cooperam para a supressão da vegetação local são as queimadas, a retirada da madeira nobre e em seguida a plantação de algodão e café. O café, por sua vez, é a cobertura vegetal secundária mais abundante na região, podendo ser vista em diversos locais e, principalmente, em vertentes não

muito íngremes. Além do café, no sopé das vertentes encontram-se campos gramíneos que são usados principalmente para pastagem (Figura 7).

Figura 6. Exemplo de vegetação local no qual se percebe a inserção em uma vertente e um dossel de aproximadamente 20m.



Figura 7. Visão geral da vegetação local na qual se percebe gramíneas utilizadas para pastagem, cultivo de café e vegetação nativa.



BAUXITA: HISTÓRICO E ESTADO DA ARTE

3.1 Bauxita: gênese e tipologia

De acordo com Gordon (1958), a história da descoberta e dos primeiros trabalhos sobre bauxita se deram na região Les Baux, França, no ano de 1829 com a premissa inicial de que se tratava apenas de minério de ferro, mas que, após análises químicas laboratoriais, deram conta de maior existência de teor de alumínio misturado com óxidos de ferro.

A composição química da bauxita representou, durante muito tempo, um ponto de divergência entre pesquisadores que se dividiam em dois grupos: i) aquele que defendia que a bauxita simplesmente possui um pequeno teor de hidróxido de alumínio e, ii) aquele que acreditava que bauxita somente é bauxita quando possui um teor maior desse mesmo hidróxido. Embora a pouca quantidade de alumínio na bauxita não impeça a sua utilização, existindo para isso o beneficiamento e aplicação de métodos químicos que a tornam usual, geralmente sob custos de produção mais elevados, atualmente é comum considerar a bauxita como uma forma superficial de acumulação de alumínio que, mesmo contendo outros elementos, destaca-se pela sua maior presença em relação aos demais.

Gordon (1958) e Harder (1952), primeiros autores a se dedicarem aos estudos de bauxita em solo americano (mais precisamente no Arkansas, EUA), estabelecem uma definição clássica para a bauxita que permite considerá-la como sendo um conjunto de minerais aluminosos agregados na forma de óxidos hidratados, e que possuem impurezas brandas ou em grandes concentrações. Tais características definem-na como sendo uma rocha.

Luz e Lins (2008) consideram que a bauxitização corresponde a um conjunto de processos intempéricos que cooperam para o surgimento da bauxita. Como seu resultado, tem-se a predominância de óxido hidratado de alumínio, ou trihidratado, associado ao óxido de ferro, sílica remanescente e outras impurezas.

Ao longo de mais de 150 anos de pesquisas e publicações sobre a bauxita, Carvalho (1989) ressalta o consenso científico de que a bauxitização é um processo intempérico relacionado às altas temperaturas, ciclo climático envolvendo presença de umidade, inclinação de vertentes (que permite remoção de minerais), lixiviação

acentuada, além das ligações químicas complexas que resultam em reações, saturações, mobilizações e surgimento de novos minerais. Tais características são favorecidas em zonas tropicais e intertropicais. Em termos cronológicos, para Bigarella et al. (1996) existem bauxitas que datam desde o Proterozóico até o Neógeno, destacando-se aquelas formadas durante o Eoceno e Mioceno (Tardy, 1993).

De acordo com Carvalho (1989), são várias as formas de classificar as bauxitas como, por exemplo, quanto à composição da rocha-mãe, critério morfogenético, unidades fisiográficas, níveis topográficos, aspectos deposicionais, litologia do substrato, nível de industrialização, entre tantas outras. De todas as classificações, a mais usual é a proposta por Lelong (1976) *apud* Carvalho (1989), presente ainda em Bigarella et al. (1996), que considera critérios como: morfologia do depósito e aspectos da gênese. Tal classificação resulta em três tipos distintos de bauxita: Cársticas, Lateríticas e Sedimentares.

3.1.1 Gênese de Depósitos Cársticos

O relevo cárstico corresponde a um conjunto de formas associadas à dissolução de minerais em rochas e ocorre principalmente em rochas calcárias. Neste relevo o principal agente modelador é a água, agindo através da dissolução dos minerais primários, como a calcita, e conduzindo a uma configuração ruiforme da paisagem. (FLORENZANO, 2008).

A corrosão que esse relevo sofre leva ao aparecimento de cavidades estruturais que funcionam como acumuladores de materiais intemperizados. A literatura sobre as bauxitas de *carst* não revela um consenso, mas um conjunto de divergências sobre a origem da bauxita nessas regiões. Uma das indagações que pesquisadores estão divididos é sobre a origem do material bauxítico que é encontrado nessas cavidades.

Dois grupos figuram como centro da discussão. Um grupo, considerado defensor da tese do autoctonismo, considera que a origem do material bauxítico é a alteração da própria rocha calcária, *in situ* e, ali mesmo, a intemperização descalcificou os calcários e forneceu o material que evoluiu para a bauxita. Outro grupo, adepto do aloctonismo, considera que a origem bauxítica ocorreu a partir das alterações e transporte de materiais residuais de meio rico em ferro, alumínio e silício e que, os resultados dessas alterações foram depositados na formação carstica.

A bauxitização cárstica introduz dois conceitos importantes no que se refere aos mecanismos de disposição na rocha. Essa deposição pode ocorrer *in situ* ou não.

Quando o material intemperizado é trabalhado e retrabalhado no mesmo local em que se depositou sobre a rocha calcária, é denominado bauxita autóctone. Quando o material é trabalhado e retrabalho em outras localidades, fora dos locais deposicionais, a bauxita é considerada do tipo alóctone.

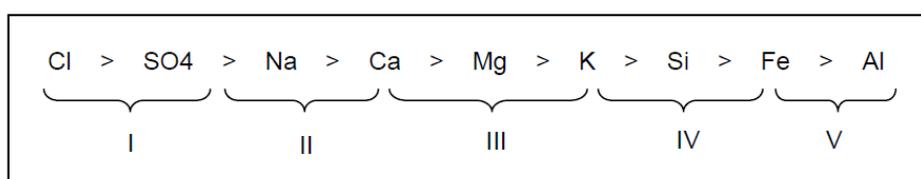
3.1.2 Gênese de Depósitos Lateríticos

Para Bigarela et al (1996), as lateritas são, na perspectiva da Geomorfologia, um material altamente intemperizado rico em óxidos de ferro e/ou alumínio, podendo também ocorrer ambos, não sendo presentes bases e silicatos de primeira ordem, podendo existir ainda quartzo residual e caulinita neoformada. Diante disso, Tardy (1993), considera a bauxita como sendo pertencente a um grupo de laterita por conta da semelhança entre os materiais encontrados em ambos. Dois tipos importantes de lateritas seriam as couraças ferruginosas (cangas) e as bauxitas.

Os hidróxidos e/ou óxidos de alumínio presentes em tais lateritas são oriundos da lixiviação e de alterações pedogenéticas de rochas com a presença de cristais aluminosos e silicatados, tais como minerais primários geogênicos (principalmente feldspatos), caulinita, halloysita e quartzo.

De todos os agentes intempéricos, Tolledo et al (2001) considera a água o mais importante, pela forma com que interage mobilizando os elementos (Figura 8).

Figura 8. Graus de solubilidade dos elementos químicos.



Fonte: Arenare, 2009.

Os constituintes químicos que possuem menor solubilidade permanecem no sistema de alteração e são, ao passar do tempo, enriquecidos em razão da permanência das condições de intemperismo. Assim, observa-se que o ferro e o alumínio resistem à interferência da água, enquanto outros elementos menos estáveis são mobilizados.

A mobilização, que leva ao retrabalhamento da mineralogia primária das rochas em uma mineralogia secundária nos produtos de alteração, ocorre através de processos

químicos como hidratação, dissolução, hidrólise e, por fim, a oxidação. A hidrólise e a oxidação são os principais processos responsáveis pelo processo de laterização.

A composição mineral da bauxita é determinada principalmente pela presença maciça de alumínio, que possui em suas ligações químicas óxidos trihidratados correspondentes à gibsita (ou hidroargilita), podendo ainda ter óxidos do tipo monohidratados, como bohemita ou diásporo. As lateritas podem acumular também outros produtos do intemperismo das rochas, sejam eles secundários ou residuais, além de materiais alóctones quando formadas a partir da sedimentação.

Para o surgimento da bauxita, a rocha mãe, como é chamado o protólito, passa por um processo intempérico que lhe garante um percentual de alumínio muito maior que a rocha original, além da mobilização e retirada de elementos alcalinos, alcalinos terrosos e sílica, que resulta na concentração por acumulação relativa de alumínio. O exemplo a partir de um xisto na tabela 1 apresenta essa transformação.

Tabela 1. Alterações químicas no processo de transformação do xisto em bauxita em %.

ROCHA	SiO ₂ (Dióxido de Silício)	TiO ₂ (Dióxido de Titânio)	Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	Fe ₂ O ₃ (Hematita)	FeO (Óxido de Ferro)	CaO (Óxido de Cálcio)	MgO (Óxido de Magnésio)	H ₂ O (Água)
Xisto Cristalino	60,8	0,65	12,38	3,28	4,2	9,43	1,95	1,8
Xisto semi-decomposto	16,23	0,93	26,82	42,09	-	-	-	14,2
Bauxita	0,93	1,04	67,88	4,09	-	0,36	-	26,47

Adaptado de Bigarela et al. (1996).

A perda de silício na forma de H₄SiO₄, a conservação dos teores de titânio, o aumento das concentrações de alumínio, o aumento de óxidos de ferros (que pode garantir à bauxita a imagem coloração avermelhada), a perda dos alcalinos terrosos, o aumento do conteúdo de água, entre outros, são algumas das alterações químicas mais comuns para ocorrência da bauxita. Assim, os silicatos e argilominerais são decompostos e por fim é removida a maior parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados aumentando suas concentrações e o potencial metalúrgico delas.

As bauxitas trihidratadas possuem maior presença de gibbsita, enquanto as bauxitas monohidratadas são aquelas em que predominam a bohemita e o diásporo. As bauxitas trihidratadas podem conter até 2% de bohemita e as monohidratadas pequenas

frações de diásporo. No Brasil não é comum a presença da boehmita em bauxitas, mas apenas da gibbsita. Quando encontrada, sua gênese foi associada à desidratação da gibbsita por influência da atividade pedobiológica, mas não por intemperismo dos minerais primários.

Considerando a composição mineralógica das bauxitas e sua utilização metalúrgica, o diásporo é um mineral que dificulta o beneficiamento do alumínio (Tabela 2). As bauxitas trihidratadas são mais puras e aptas para utilização sem que haja necessidade de beneficiamento industrial. As composições mineralógica e química permitem agrupar as bauxitas em metalúrgicas e não metalúrgicas. Exemplos de processos que permitem a utilização da alumina a partir do beneficiamento são: Bayer e Hall-Héroult.

Tabela 2. Teores químicos para nível de metalurgia de bauxitas.

MINERAIS DE ALUMÍNIO			
Mineral	Gibbsita	Boehmita	Diásporo
Fórmula química	Al(OH) ₃ - γ	AlOOH - γ	AlOOH - α
Al ₂ O ₃ :H ₂ O	1: 3	1: 1	1: 1
(%) máxima de alumínio	65,4	85,0	85,0
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômico	Ortorrômico
Dureza Moh	2,5-3,5	3,5-4,0	6,5-7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
Temperatura (°C) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	Al ₂ O ₃ - γ	Al ₂ O ₃ - γ	Al ₂ O ₃ - α
Solubilidade (g Al ₂ O ₃ /L) (*)	128	54	Insolúvel
(*) Em solução de Na ₂ O a 100 g/L, a 125 °C.			
Bauxita Não-Metalúrgica		Bauxita Metalúrgica	
Constituintes	(%)	Constituintes	(%)
Fe ₂ O ₃	2,5 (máx.)	Fe ₂ O ₃	11 - 12
SiO ₂	5 - 7	SiO ₂	< 4,0
Al ₂ O ₃	50	Al ₂ O ₃ *	> 48
Densidade aparente > 3		*Alumina aproveitável pelo processo Bayer	

Fonte: Habashi, 1993, apud Luz e Lins, 2008.

Diante da possibilidade do beneficiamento industrial para produção de alumínio, sobretudo após a Revolução Industrial, a utilização do alumínio aumentou consideravelmente no mundo, tendo na bauxita sua principal fonte de extração. Neste contexto, o beneficiamento industrial para utilização do alumínio desenvolveu-se a partir de eletrolise na Inglaterra, em meados do século XIX (COSTA, 2010).

3.1.3 Gênese de Depósitos Sedimentares

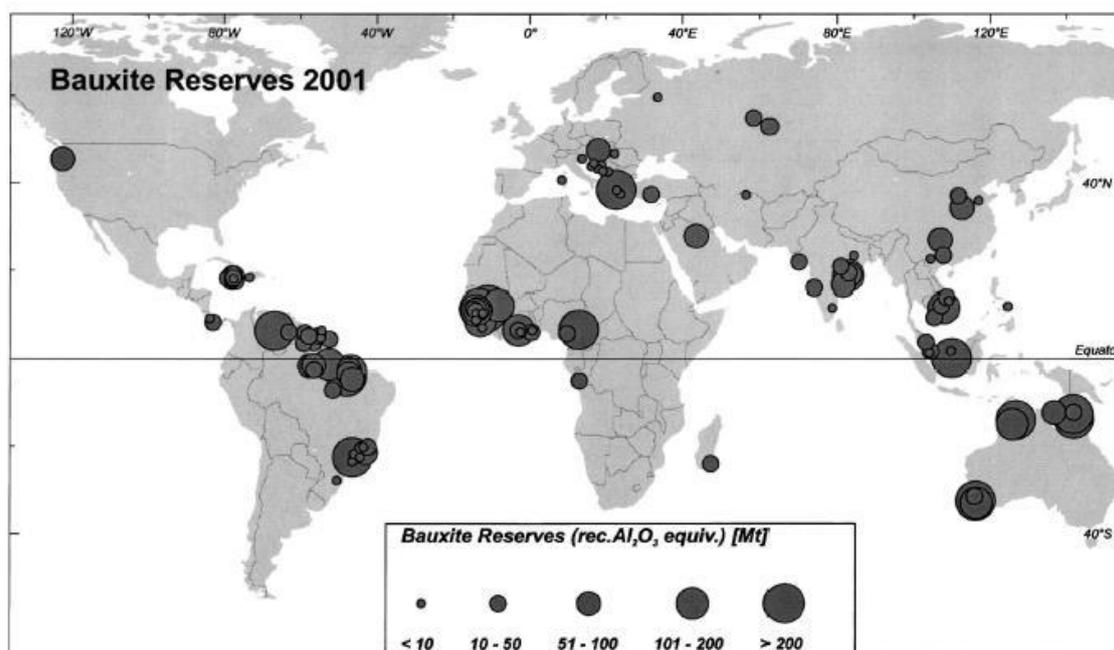
Os depósitos sedimentares de bauxita constituem o tipo alóctone, ou seja, não foram formadas *in situ*, sendo, dessa maneira, resultado da deposição de materiais transportados de regiões vizinhas aos locais em que estão dispostos.

A identificação de um tipo de jazida de bauxita alóctone ocorre na investigação do potencial da rocha parental ser incapaz de originar os hidróxidos de alumínio fundamentais para a ocorrência da bauxita. Um exemplo dessa ocorrência é a disposição de bauxita, rica em quartzo, sobre o Sienito (BIGARELA ET AL., 1996). Como se trata de uma rocha que pode originar bauxita, mas que é pobre em quartzo, essa composição mineralógica representa a mistura de diferentes materiais.

3.2 A bauxita no Brasil e no mundo

Muitas das reservas de bauxita do mundo estão concentradas em regiões tropicais e subtropicais, ou em regiões que num passado geológico estiveram submetidas à intensa atividade intempérica e contextos geológicos favoráveis à evolução da bauxita (Figura 9).

Figura 9 – Distribuição mundial das principais reservas de bauxita



Fonte: Arenare, 2009

Países como Austrália, Guiana, Guiana Francesa, Brasil, Guiné, Camarões e na região do Caribe concentram bauxitas do tipo laterítico, enquanto as bauxitas do tipo

cárstico se concentram nos países europeus, sendo na Jamaica única exceção (MEYER, 2004).

Em se tratando das reservas brasileiras, elas representam 10,6% das reservas mundiais com uma produção em torno dos 3,4 bilhões de toneladas/ano, uma das três maiores produções metalúrgicas do mundo (DNPN, 2012). Aproximadamente 84% dos depósitos explorados no Brasil são do tipo metalúrgico, ou seja, com alumínio do tipo trihidratado, rico em gibbsita. Os demais apresentam mais caulinita e óxidos/hidróxidos de ferro na sua constituição.

De acordo com Abreu (1973), as bauxitas brasileiras originam-se da laterização (acumulações residuais, sobretudo) de rochas ricas em feldspatos ou argilas com fonte de alumínio, como as caulinitas. Geralmente as condições são descritas como a presença de morfologias planas, como platôs (KOUTSCHOUBEY, 1988), climas úmidos tropicais e contexto geológico cenozoico.

Especificamente, na região norte, com exceção do depósito da Província de Carajás onde a bauxita é associada à rocha básica (basaltos) Pré-Cambriana do Grupo Grão Pará (COSTA et al. 1997), os principais depósitos de bauxita da Amazônia (Porto Trombetas, Nhamundá, Juruti, Almerim, Paragominas, Mazagão) são desenvolvidos a partir de rochas sedimentares clásticas, localizadas na sub-bacia do Baixo Amazonas.

Na região Sudeste encontram-se os 24 depósitos na região do Quadrilátero Ferrífero, originados sobre rochas filíticas do Super Grupo Minas (VARAJÃO, 1988; VARAJÃO, 1988B; VARAJÃO ET AL., 1989; 1989B); os depósitos de Cataguases e cinturão aluminoso associado, que se desenvolveram sobre rochas gnáissicas de período Pré-cambriano no Complexo Juiz de Fora (BEISSNER ET AL., 1997; LOPES 1997; LOPES E CARVALHO, 1998; VALETON E MELFI, 1988; VALETON ET AL., 1991) e as ocorrências associadas às rochas alcalinas em depósitos como Passa Quatro, Redondo, Itatiaia e Poços de Caldas em Minas Gerais; Resende, Miraí, Rio Bonito, Macacu e Medanha no Rio de Janeiro; e Lavrinhas em São Paulo. Em São Paulo outras ocorrências são diagnosticadas, associadas à Província Mantiqueira e rochas do Pré-cambriano, tais como anfíbolitos, diabásios e granitos.

Na região Centro-Oeste tornaram-se conhecidos os depósitos de Barro Alto (OLIVEIRA, 2011), associados à alteração superficial de anortositos da porção superior do Complexo Máfico-Ultramáfico Acamadado de Barro Alto.

Lages e Correia Pinto, no estado de Santa Catarina, são os depósitos conhecidos na região Sul. Sua gênese está associada a rochas basálticas, diabásicas e fonolíticas (DANI, 1988; FORMOSO ET AL., 1990; 1997).

3.3 A bauxita na Região de Espera Feliz

Geologicamente, a região Espera Feliz está contida no Complexo Juiz de Fora, Grupo Andrelândia, de idade Neoproterozóica (HORN ET AL., 2007), caracterizado por rochas intrusivas gnaissificadas e ainda dentro do cinturão orogênico aluminoso, que se estende pela borda Leste de Minas Gerais até o Espírito Santo.

No que tange ao cinturão aluminoso, na região de Espera Feliz afloram ocorrências moderadas de bauxita dispersas na superfície dos topos dos morrotes locais. Os trabalhos nessa região ainda são escassos, porém, algumas descobertas importantes já foram realizadas nos trabalhos de Soares (2013).

Soares (2013) identificou que a rocha formadora da bauxita local é um gnaiss granulítico pertencente ao charnokítico, denominado charno-enderbito com inclusões máficas. Através do estudo de exposições em perfis, essa autora constatou que a gênese e evolução da bauxita desenvolveram as seguintes fácies de alteração: isalterítica caulínica, bauxita isalterítica, bauxita laminar e bauxita fragmentada.

No processo de transformação da rocha em bauxita, os plagioclásios foram transformados em gibbista diretamente por alitização, ao passo que os ortoclásios foram transformados em caulinita por monossilicização. O ferro, exsudado dos minerais ferromagnesianos, precipita em vazios interminerais e intraminerais. Essas transformações são descritas num córtex de alteração que evolui para uma fácies bauxita isalterítica.

MINERALOGIA E SENSORIAMENTO REMOTO

4.1 O Sensoriamento Remoto e sua aplicação na prospecção mineral

O sensoriamento remoto compreende um conjunto de técnicas de aquisição de imagens da terra a partir de plataformas orbitais nas quais o operador não tem contato direto com o alvo. As aplicações do sensoriamento remoto são as mais variadas possíveis, a partir do momento em que se usam técnicas de processamento digital de imagens para retirada de informações espectrais presentes nas imagens adquiridas.

O potencial do uso dos sensores orbitais foi testado para diferentes finalidades, onde se observa também o mapeamento geológico. No Brasil, as pesquisas que alinham sensoriamento remoto e investigação mineralógica destacam-se principalmente a partir da implementação do Landsat TM 5, em meados da década de 80, que possui uma banda (conhecida como banda geológica) com boas respostas espectrais na identificação de minerais com íons e hidroxilas, operando na faixa entre 2,08 μm e 2,35 μm . O uso de imagens da banda geológica do sensor TM, demonstrou um enorme potencial de diferenciação mineralógica e possibilitou diversas pesquisas, uma vez que através desta banda é possível identificar diversos minerais, principalmente os aluminosos.

Diante disso, alguns trabalhos nesse sentido merecem destaque desde a década de 80 até os dias atuais. Ricomini e Crósta (1988) utilizaram imagens do Landsat MSS 4 para identificar os lineamentos em área de granitóides no município de Mandira, sendo uma das primeiras referências nesse tipo de investigação a partir de dados orbitais. Varajão e Menezes (1989) mapearam coberturas lateríticas ferruginosas e bauxíticas na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, a partir da divisão de bandas espectrais do Sensor TM, sempre considerando a banda geológica nos processamentos. Na prospecção mineral, Follador (2004) testou diversas combinações entre canais do TM 5 para evidenciar o potencial da Análise de Componentes Principais em identificar áreas com potencial mineral, observando ainda fraturas e falhas. Lima (2011) investigou a espacialização de Ferro itabirítico na Serra do Bom Sucesso em Minas Gerais usando imagens da série Landsat.

Outro exemplo de sensor com fortes aplicações na geologia é o ASTER. Como o Landsat, esse sensor possui resolução espacial de 30 metros, porém possui quatro bandas capazes de identificar informações relacionadas à mineralogia, representando

um ganho em relação Landsat. Neste ultimo, o imageamento mineralógico fica concentrado em apenas uma banda. Mais informações sobre esse sensor são apresentadas no item 4.3.

Com o Sensor ASTER, Lima (2003) identificou as principais fácies de alteração de granitoides na porção central do Brasil. Este sensor permitiu ainda a Veloso (2009) identificar os diferentes tipos de rejeitos de garimpo no Rio Grande do Sul. Outra aplicação desse sensor tem sido na criação de bibliotecas espectrais experimentais de diferenciação de bauxitas nacionais, por Rocha e Souza Filho (2013).

4.2 Fatores importantes para uso do Sensoriamento Remoto nas investigações geológicas

Para o uso do sensoriamento remoto em aplicações geológicas é necessário que o pesquisador observe alguns fatores que não de cooperar na qualidade das informações obtidas dos seus alvos. A aquisição de imagens orbitais para qualquer finalidade deve sempre ser resguardada de fatores que podem prejudicar as informações extraídas dessas imagens e assim interferir no processo de interpretação dos resultados. Visando reduzir esses inconvenientes, Tavares Junior (2003) cita alguns procedimentos importantes:

1. Características do sensor:
 - a) *Resolução Espacial:* A escolha de imagens com boas resoluções contribui de forma significativa ao identificar feições pequenas, que dependendo do alvo investigado, é importante na análise geológica.
 - b) *Resolução Espectral:* O conhecimento da quantidade de bandas de um determinado sensor e, sua faixa de imageamento, é essencial na detecção de características de um alvo investigado. Isso auxilia o usuário na escolha das melhores composições para evidenciar o alvo investigado.
 - c) *Resolução Radiométrica:* corresponde ao nível de sensibilidade que o sensor possui ao diferenciar alvos em uma cena, entre a presença máxima de radiância ou a ausência total dela (zero absoluto). A resolução radiométrica proporciona a identificação da variabilidade litológica do local investigado.
2. Litologia (tipo e origem das rochas): a identificação de unidades geológicas ocorre partindo do princípio que, diferentes tipos de rochas possuem comportamentos espectrais diferentes e únicos, por conta dos minerais que as

constitui. Tavares Junior (2003) ressalta que algumas características das rochas resultam em comportamentos espectrais específicos, tais como: minerais de rochas ígneas resultam em curvas de reflectância lisas, diferenciando, por exemplo, rochas félsicas e máficas. A reflectância tem um comportamento decrescente em rochas com o teor de ácido. Em rochas parcialmente alteradas, verifica-se um comportamento semelhante, porém com intensidade de reflectância um pouco mais elevada. Quando se trata de rochas bem alteradas, o comportamento do solo em que ela se deriva é a resposta espectral a ser considerada.

3. Característica das variações sazonais refletidas pela vegetação: Este fator é importante por que através dele podem ser realizadas associações entre coberturas vegetais e substrato rochoso, servindo de parâmetro para mapeamento. Para isso, observam-se os períodos chuvosos e secos, no qual a vegetação é mais viva ou deficiente, favorecendo ou não a fotointerpretação dos traços estruturais. Quando, independentemente da estação, o comportamento da vegetação não exhibe ganho, o solo é pobre e, o solo nada mais é do que resultante do substrato rochoso local. Nesse caso, as respostas espectrais encontradas multitemporalmente na vegetação podem estar associadas fortemente a variabilidade litológica e/ou pedológica. A maioria das investigações de cunho mineralógico, utilizando sensores orbitais, tem sido realizada com maior sucesso em regiões secas (áridas e semi-áridas). Isso ocorre uma vez que, as áreas secas apresentam uma grande quantidade de material exposto na superfície e permitem a aquisição de informações espectrais diretamente da associação entre a rocha e o solo, sem interferência, por tanto, da cobertura vegetal. Para Lima (2003), o oposto ocorre em áreas tropicais e subtropicais, devido à existência de gramíneas nos ambientes e que recobrem a superfície terrestre dificultando a identificação mineralógica nas imagens orbitais. Diante disso, a boa identificação dos alvos litológicos na imagem depende principalmente do grau de exposição litológica na superfície imageada, ou da mistura espectral que há entre o solo, a rocha e a vegetação rasteira (GALVÃO ET AL., 2003).

4. Influência das variações sazonais oriundas dos ângulos solares de elevação e azimute: prejudicam a interpretação das imagens de uma forma geral, uma vez que, de acordo com o período do ano, o sol pode estar mais próximo ou mais distante de uma localidade, ressalvada regiões equatoriais. Quando existe uma elevação solar pequena, o realce sobre o terreno é melhor e facilita a identificação das estruturas e lineamentos, além de ter pouco sombreamento. Há ainda, a preocupação pela correção geométrica da imagem em especial utilizando um modelo digital de terreno para a ortoretificação desta imagem, isto minimiza ainda mais os efeitos da iluminação. Com essas limitações, a correção na imagem é extremamente necessária e também a verificação de outros períodos do ano em que o comportamento solar contribuição para redução dos inconvenientes.

4.3 Sensor Aster

O satélite Terra é o equipamento orbital responsável por levar a bordo o sensor de imageamento ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) bem como outros quatro: MODIS, CERES, MOPIT e MISR. O projeto Terra é uma cooperação multinacional que envolve Estados Unidos e Japão. Os sensores a bordo do Terra foram desenvolvidos pelo país norte-americano e, o equipamento que leva os sensores foi criado pelo Japão, sendo o lançamento do satélite realizado no dia 18 de dezembro de 1999. O sensor Aster tem órbita sol-síncrona, altitude de 705 km, período orbital de 98,9 minutos e cobertura total da Terra em 16 dias. A dimensão da cena imageada pelo Aster é de 60 x 60km.

O ASTER é um sensor do tipo multiespectral que, possui 14 bandas assim distribuídas: região do Visível e Infravermelho Próximo (VNIR), com três bandas e resolução espacial de 15 metros; região do Infravermelho curto (SWIR), com seis bandas que possui resolução espacial de 30 metros; e região do Infravermelho Termal (TIR), que possui cinco bandas e uma resolução espacial de 90 metros (Tabela 3).

Tabela 3 – Dados operacionais do Sensor Aster.

REGIÃO DO ESPECTRO	BANDA	INTERVALO ESPECTRAL (μm)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)
VNIR	1	0,520 - 0,600	15
	2	0,630 - 0,690	
	3B e 3N	0,760 - 0,860	
SWIR	4	1,600 - 1,700	30
	5	2,145 - 2,185	
	6	2,185 - 2,225	
	7	2,235 - 2,285	
	8	2,295 - 2,360	
	9	2,360 - 2,430	
TIR	10	8,125 - 8,475	90
	11	8,475 - 8,825	
	12	8,925 - 9,275	
	13	10,250 - 10,950	
	14	10,950 - 11,650	

Fonte: Portal USGS

As 14 bandas e os diferentes intervalos espectrais que são cobertos pelo sensor Aster permitem uma vasta gama de investigações geológicas, dentre as quais as posições do espectro onde alguns minerais presentes em solos e rochas são mais evidenciados. Por exemplo, a faixa do SWIR permite identificar argilo-minerais tais como caulinita e gibbsita. Minerais com conteúdo em ferro são exibidos na faixa do VNIR de $0.50 \mu m$ e abaixo de $0.90 \mu m$. Em relação ao Landsat, o Aster possui uma menor resolução nanométrica, com mais bandas e estreitamento entre as faixas de cada banda, o que permite a identificação de mais alvos em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

O sensor Aster apresenta-se, em termos do que tem sido apontado pela literatura, como portador dos melhores resultados para o estudo espectral de ocorrências mineralógicas em coberturas superficiais, sobretudo considerando a existência de bandas espectrais capazes de identificar materiais de composição aluminosa.

4.4 O uso da biblioteca espectral para a prospecção de Bauxita

A biblioteca espectral corresponde ao armazenamento das curvas espectrais de um alvo específico, ou de vários. Quando há o conhecimento de seu comportamento, esse conhecimento pode ser utilizado para classificar uma imagem orbital, identificando o mesmo alvo em toda a área da cena. O conhecimento das curvas, denominadas de *Curvas referência*, pode ser obtido de várias formas, com destaque para a aquisição em

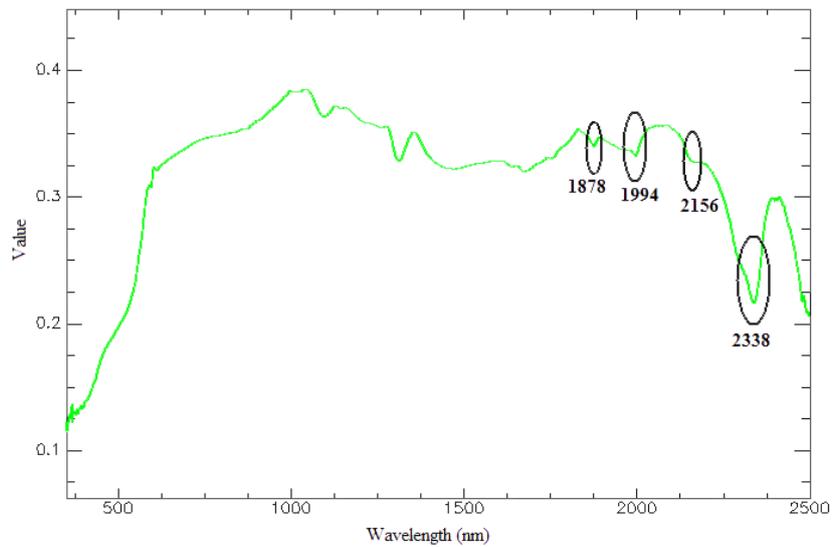
campo a partir de espectroradiômetro ou, a partir de uma imagem digital na qual se conhece as localizações do alvo.

As características físicas de um determinado alvo, identificado em uma imagem orbital, vão lhe conceber uma assinatura espectral ímpar, que, segundo Hunt e Ashley (1979), é visto como medida de reflectância deste material. Esta reflectância é representada de variadas formas, incluindo linhas, inclinações, depressões e outras formas no gráfico que caracterizam a assinatura espectral do alvo (Figura 10). Os comportamentos do gráfico são consequência da constituição química e física do material, além da forma geométrica na qual seus átomos estão dispostos.

O espectroradiômetro é um equipamento capaz de identificar como se comporta um alvo em diferentes faixas espectrais. Ele identifica a forma do comportamento da luz a partir do comprimento de onda do visível, bem como no infravermelho. Essa interação entre a fonte de excitação e os minerais resulta em um sinal chamado de reflectância, com uma determinada curva espectral. O conhecimento mineralógico da composição e arranjo do alvo auxilia na identificação do comportamento de cada mineral em uma dada curva espectral.

Existe uma diferença de resolução entre *curvas espectrais referenciais* obtidas pelo espectroradiômetro e as disponíveis na imagem. Isso ocorre porque o sensor orbital imageia em intervalos espectrais (faixas de banda) específicas. Um exemplo disso é o sensor ASTER, ele imageia com uma resolução espectral de $0,8 \mu m$ nas faixas do VNIR. Diante disso, é necessário reamostrar os resultados obtidos pelo instrumento, compatibilizando-os de acordo com a resolução espectral do sensor a ser utilizado, conforme Rocha e Souza Filho (2013) (Figura 11 e 12).

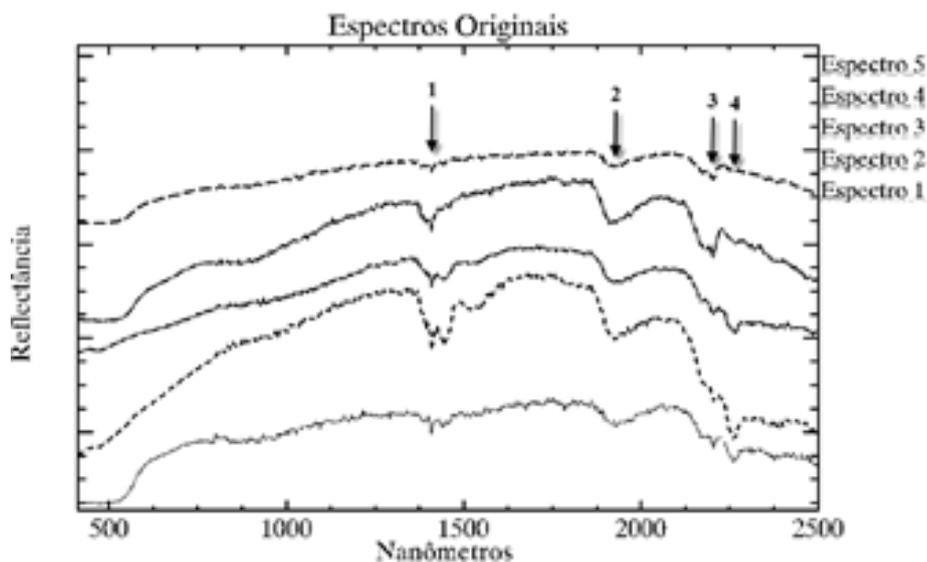
Figura 10 - Exemplo de curva espectral do mineral calcita. Os valores numéricos referem-se aos pontos de absorção da calcita.



Fonte: Biblioteca espectral de Bauxita, Unicamp (2014).

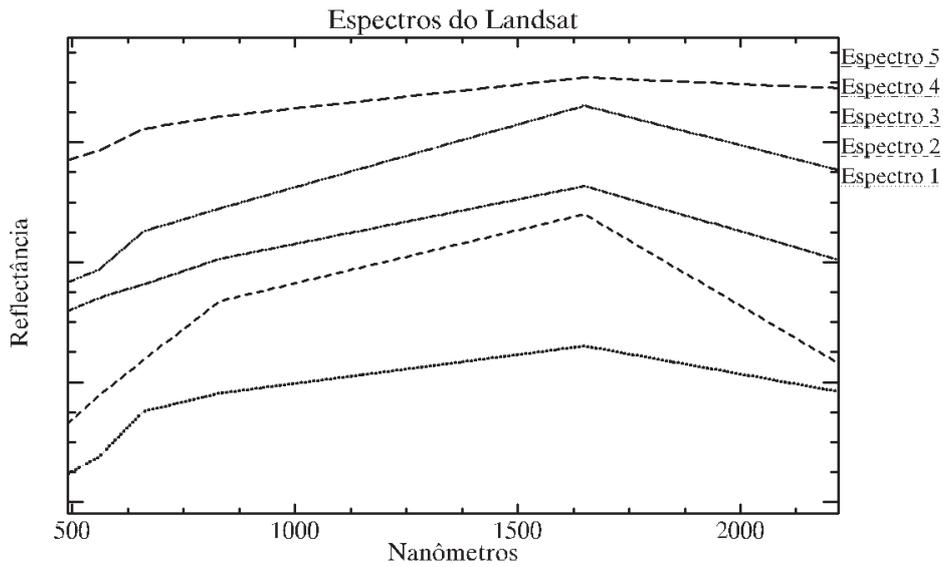
Menezes e Almeida (2011) ressaltam que os sensores hiperespectrais apresentam melhores resultados na construção de uma biblioteca, sobretudo porque a resolução espectral desse tipo de sensor se aproxima melhor das curvas obtidas pelo espectrorradiômetro. Certas feições de absorção da caulinita, por exemplo, não são identificadas em determinadas resoluções espectrais, uma vez que essas curvas apresentam ganhos ou reduções dependendo das configurações do sensor utilizado (Figuras 11, 12 e 13). Isso é verificado ao se comparar os espectros de reamostragem da caulinita para os sensores Aster e Landsat.

Figura 11. Espectros de solo originais obtidos via Espectrorradiômetro.



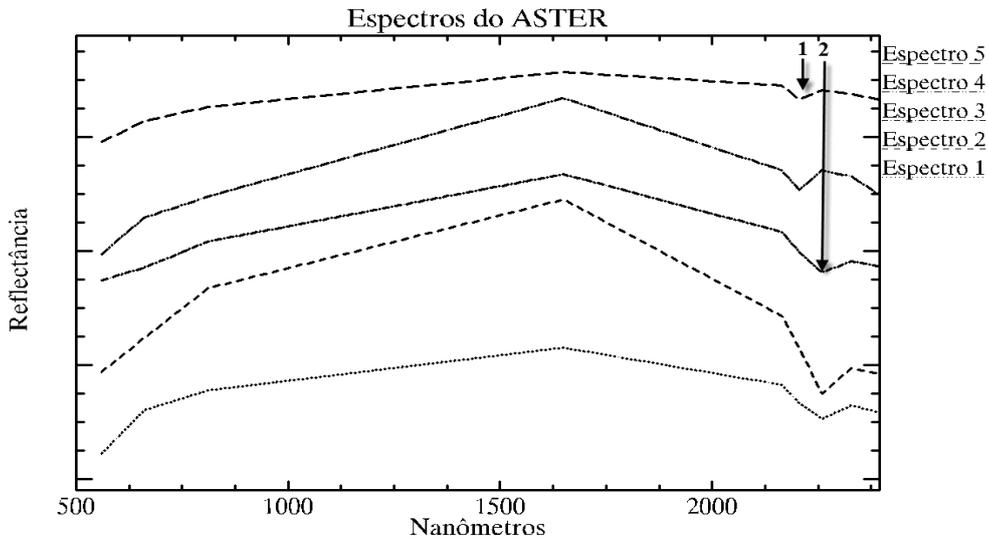
Fonte: Menezes e Almeida (2011).

Figura 12. Espectros de solo reamostrados para o Sensor Landsat.



Fonte: Menezes e Almeida (2011).

Figura 12. Espectros de solo reamostrados para o Sensor Aster.



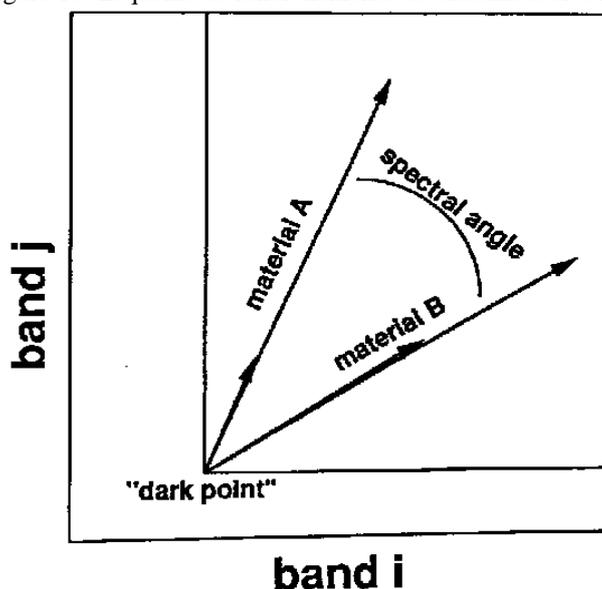
Fonte: Menezes e Almeida (2011).

O armazenamento das curvas espectrais é realizado pelo software do desenvolvedor do espectroradiômetro, como, por exemplo, *FieldSpec High-Resolution* da *Analytical Spectral*. As curvas são armazenadas em formato SPRC e são corrigidas para retirar os efeitos da luminescência, ruídos e outras perturbações do local em que são coletadas. O PRISM é um algoritmo desenvolvido Kokaly (2011) para realizar essas correções. Uma vez corrigidas, o arquivo (em formatos TXT, LYR ou ASCII) pode ser utilizado para reamostragem e posterior classificação.

Depois de armazenadas, em linguagem específica, vários softwares de processamento de imagens fazem o uso dessas informações, entre eles o ENVI, utilizado nessa pesquisa, e o IWLS. Após o armazenamento dos espectros de referência e a reamostragem (nestes mesmos softwares) desses espectros para um sensor a ser utilizado, uma classificação supervisionada, com base nestas curvas, pode ser realizada.

O *Spectral Angle Mapper Classification* – SAM (Mapeador por Ângulo Espectral) tem sido muito utilizado quando se deseja realizar uma classificação com base em curvas espectrais previamente conhecidas. O SAM é um algoritmo que determina a identificação do alvo a partir da similaridade entre dois espectros (as curvas referencias obtidas *in loco* e a reflectância na cena) através do cálculo do ângulo formado (em radianos), tratando-os como vetores em um espaço adimensional que corresponde ao número de bandas da imagem escolhida (KRUSE, 1993) (Figura 13).

Figura 13. Esquema de funcionamento do classificador SAM



Fonte: Sohn e Rebello (2002).

Os primeiros registros em que a biblioteca espectral aparece na literatura referem-se à Hunt e Salisbury (1970). Esses autores propuseram a construção de uma biblioteca espectral de rochas e minerais silicatados. Na atualidade, diversas áreas de conhecimento utilizam bibliotecas espectrais para a identificação de alvos em imagens, tal como tem sido feito, por exemplo, na botânica e na pedologia.

Crósta (1993), seguindo a metodologia de Hunt e Salisbury (1970), construiu, experimentalmente, bibliotecas espectrais de dois grupos minerais de depósitos do Brasil: hidróxidos de ferro e argilo-minerais. Rocha e Souza Filho (2013)

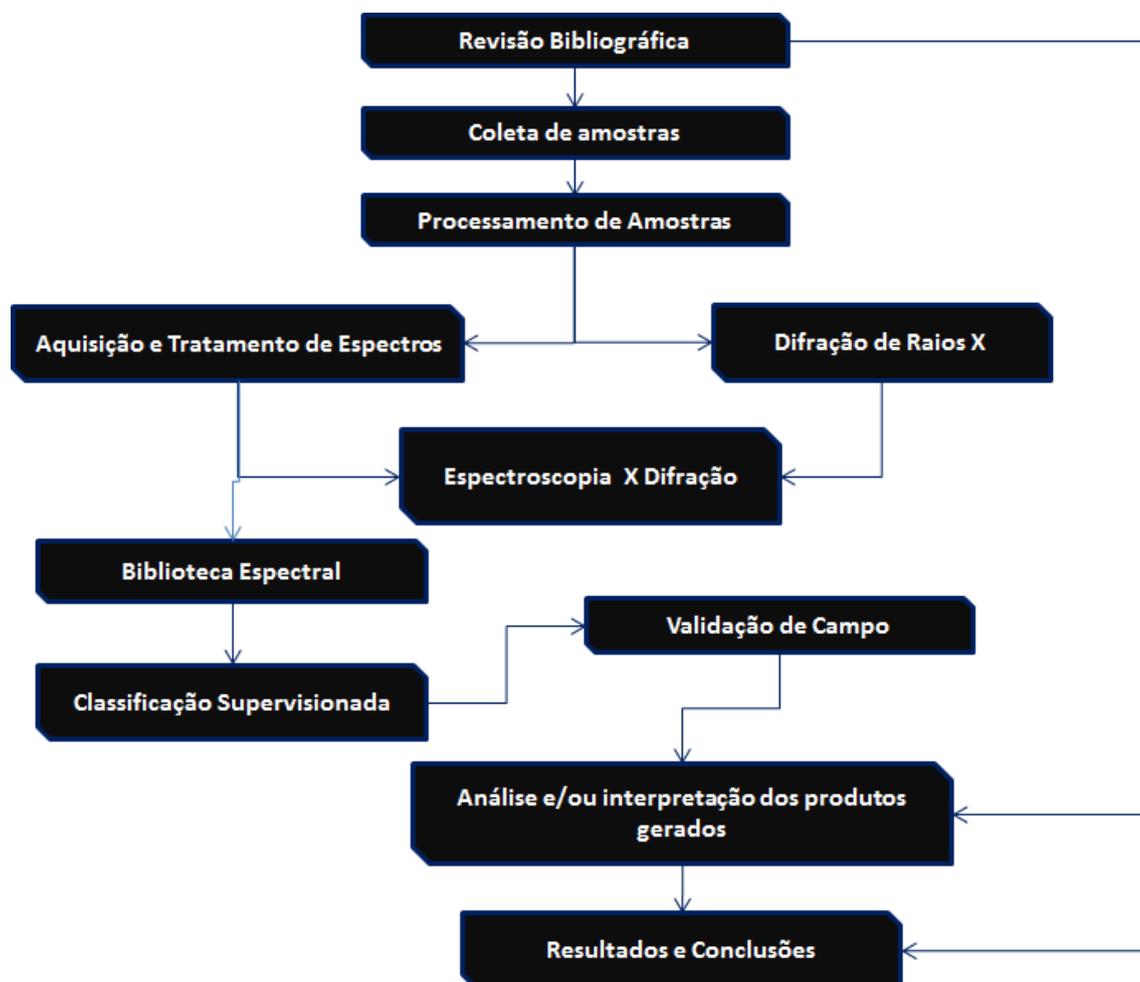
desenvolveram a biblioteca espectral exclusivamente para depósitos de bauxita no Brasil, possibilitando sua prospecção através de imagens do sensor Aster. Esta última biblioteca guarda os espectros de referência dos depósitos de Barro Alto–GO, Poços de Caldas–MG, Paragominas–PA e Itamaraty de Minas–MG, bem como as características mineralógicas obtidas a partir das técnicas de Difração por Raios-X e Microscópio Eletrônico de Varredura de amostras desses mesmos depósitos. A técnica permitiu ainda a caracterização do depósito de Fosfato em Araxá – MG, por Cruz et al. (2011).

Atualmente, as bibliotecas abertas para uso são escassas, mas merecem destaque as bibliotecas para exploração mineral do USGS e da Unicamp, ambas reamostradas para imagens Aster.

5.1 Introdução

Nesse capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos empreendidos nessa pesquisa, com destaque para os procedimentos de campo com a coleta das amostras e supervisão da classificação, a aquisição e tratamento dos dados espectrais (Obtenção de curvas espectroscópicas, processamento e pré-processamento) além das análises mineralógicas (Difração de Raios-X). Um fluxograma é apresentado abaixo (Figura 14) e, em seguida, são descritas, de modo detalhado, as etapas nele apresentadas.

Figura 14. Fluxograma dos procedimentos realizados.



5.2 Pesquisa de gabinete: pré-campo

A etapa inicial da investigação consistiu numa pesquisa bibliográfica que se desdobrou para as etapas posteriores. Inicialmente buscaram-se referências teóricas com as quais pudesse ser elaborado um “estado da arte dos conhecimentos sobre a bauxita”, em seu contexto geral, abordando sua descoberta, os primeiros trabalhos de investigação mineral, sua associação geoambiental, os tipos e suas origens. Em seguida, foram revistos trabalhos sobre as bauxitas no Brasil, dando ênfase aos processos que contribuem para evolução desta em regimes climáticos tropicais, destacando-se as bauxitas brasileiras, as reações físico-químicas, e os principais produtos geoquímicos, mineralógicos e morfológicos. Por fim, chegou-se a caracterização geoambiental, bem como da Bauxita na Região de Espera Feliz.

Da mesma maneira, foi realizada uma pesquisa bibliográfica no âmbito do Sensoriamento Remoto, de modo a identificar um método capaz de auxiliar no mapeamento de bauxita e que considerasse também a mineralogia desta. Assim, os trabalhos que enfatizam a espectroscopia de reflectância e a classificação supervisionada, utilizando o classificador Spectral Angler Mapper (SAM), foram selecionados como referência para estudo e guia prático.

Realizou-se, também, um levantamento dos produtos cartográficos, orbitais e espectrais disponíveis para a área estudada. Esses produtos, acessados/disponibilizados gratuitamente, são: i) Mapa Geológico Folha Espera Feliz SF 24-V-A-IV da CPRM na escala de 1:100.000, acompanhada de relatório; ii) SIG geológico na escala de 1:50.000 disponibilizado pelo Geobank da CPRM e iii) imagem multiespectral do Sensor Aster, referente à órbita 216 e ponto 74 do dia 15/04/2008, nos canais 1 a 3, com resolução espacial de 15m e os canais 4 a 9 com resolução espacial de 30m, e imagem de radar deste mesmo sensor com modelo digital de elevação, sendo essas imagens disponibilizadas pelo Laboratório de Espectroscopia de Reflectância da Universidade Estadual de Campinas (LER/Unicamp) e Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), respectivamente.

5.3 Trabalho de campo 1: reconhecimento e coletas

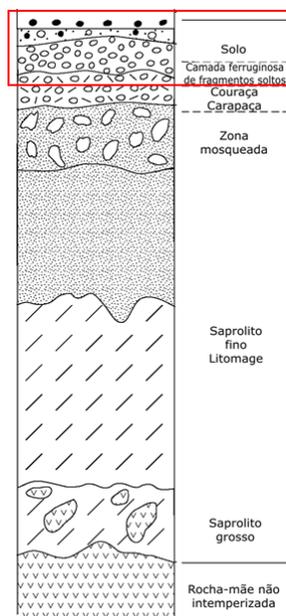
O primeiro trabalho de campo, realizado no primeiro semestre de 2014, contemplou a análise e percepção ambiental da área de estudo, bem como foram realizadas coletas de amostras em cinco perfis lateríticos da região. O objetivo dessa

coleta foi adquirir amostras de fragmentos superficiais de bauxita local para análise mineralógica e também espectral, além identificar a maneira como estão distribuídas na paisagem.

Considerando a estrutura do perfil laterítico conforme Nahon e Tardy (1992), foram selecionadas as porções superiores (Figura 15) por considerar que seriam as amostras dessas porções àquelas de resposta direta à interação com a radiação eletromagnética dos sensores orbitais, mais especificamente do Aster. Assim, foram coletadas e pontuadas, com GPS Garmin Etrex para posterior mapeamento de localização, amostras de bauxita fragmentada e dos horizontes pedológicos mais superficiais, constituintes do solum, também denominado de horizonte pedoplasmado.

Geneticamente, a relação entre os fragmentos de bauxita e os horizontes pedológicos se dá pela consideração de que o solo seria o produto da degradação física e química da bauxita; suscitando a possibilidade, inclusive, de estudos de gênese de coberturas pedológicas a partir de materiais pré-intemperizados. A localização dos perfis amostrados, enumerados de 1 a 5, é apresentada na Figura 16, bem como a descrição dos materiais amostrados é apresentada na Tabela 4.

Figura 15. Perfil laterítico clássico e indicação dos níveis amostrados em vermelho.



Fonte: Nahon e Tardy (1992).

Figura 16 – Mapa de localização dos pontos amostrados

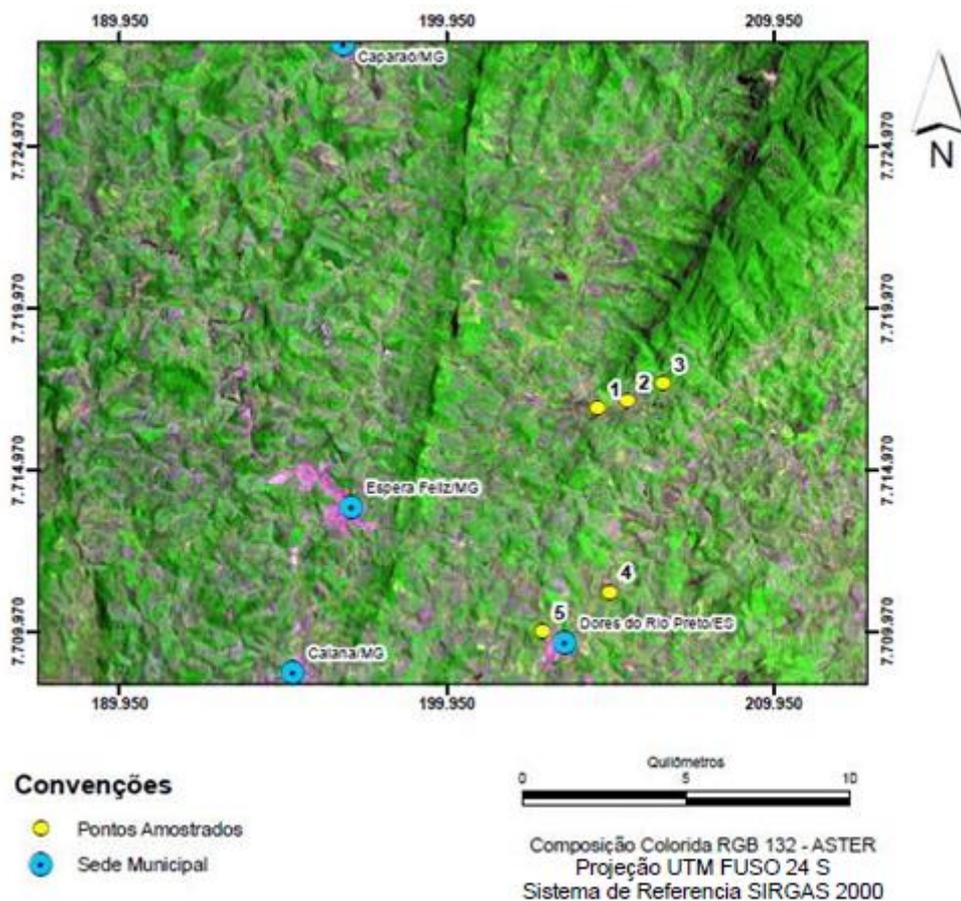


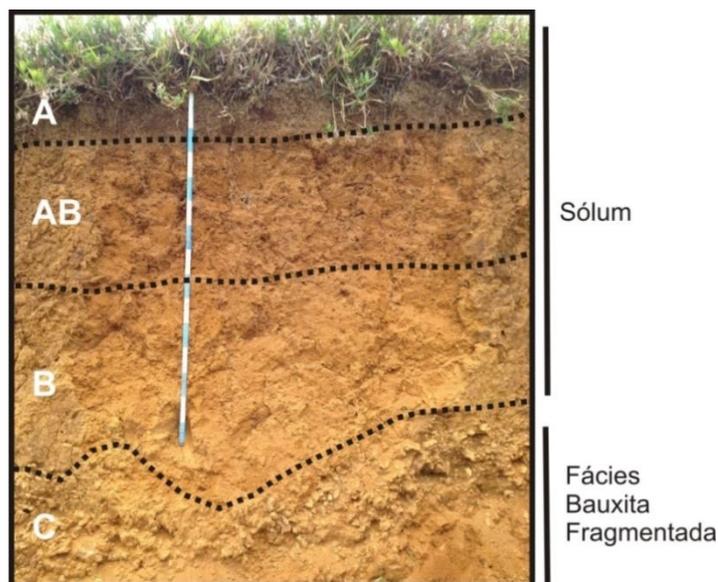
Tabela 4 - Descrição geral dos perfis e amostras coletadas

Perfil	Localização (UTM)		Amostra	Descrição
	E	N		
1	204610,22	7716912,2	1.1	Fragmentos rosados a esbranquiçados de bauxita
			1.2	Horizonte pedoplasmado - B
2	205468,33	7717123,6	2.1	Fragmentos rosados a esbranquiçados de bauxita
			2.2	Horizonte organo-mineral - A
			2.3	Horizonte pedoplasmado - B
			2.4	Córtex de alteração da rocha
3	206556,9	7717658,4	3.1	Fragmentos rosados a esbranquiçados de bauxita
			3.2	Horizonte pedoplasmado - B
			3.3	Horizonte com pedoplasmação incipiente - BC
4	204916,22	7711212,4	4.1	Fragmentos rosados a esbranquiçados de bauxita
			4.2	Horizonte organo-mineral - A
			4.3	Horizonte pedoplasmado - B
5	202874,77	7710017,8	5.1	Fragmentos rosados a esbranquiçados de bauxita
			5.2	Horizonte pedoplasmado - B
			5.3	Córtex de alteração da rocha

Um perfil lateérico representativo dos 5 pontos amostrados é apresentado na Figura 17. De maneira geral, os perfis estudados na região são assim caracterizados:

horizonte organo-mineral (horizonte A) superior de espessura variando entre 10 e 25 cm, com transição difusa e plana (incluindo, por vezes, um horizonte AB) para um horizonte B latossólico espesso, sempre superior a 50cm, sobrejacente a um horizonte fragmentário de bauxita, com fragmentos arredondados a subângulares, milimétricos a centimétricos, de coloração rosada a esbranquiçada.

Figura 17 – Perfil representativo da região de Espera Feliz



5.4 Análises laboratoriais

Os procedimentos laboratoriais compreenderam a análise mineralógica por Difração de Raios-X e análise espectroscópica de reflectância. Foram analisados tanto os fragmentos de bauxita quanto as amostras dos horizontes pedoplasmados coletadas.

5.4.1 Difração de Raios-X

A análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) foi realizada no Laboratório de Difração do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO - UFOP). As 5 amostras pulverizadas em moinho de disco orbital, referentes aos fragmentos dispersos na superfície, foram dispostas em lâminas de vidro e levadas ao Difratorômetro X'Pert Panalytical com radiação de $\text{CuK}\alpha$, no intervalo 2θ de 2 a 70° para a fração pó total. A velocidade de leitura foi de $0,6^\circ/\text{min}$. Os difratogramas foram interpretados visando a identificação das espécies minerais no Software X'Pert HighScore Plus e através de padrões da literatura (BRINDLEY E BROWN, 1980).

5.4.2 Espectroscopia de Reflectância e criação da Biblioteca Espectral

As curvas espectrais de cada amostra foram obtidas com o uso do Espectrorradiômetro FieldSpec High-Resolution, disponível no Laboratório de Espectroscopia do Instituto de Geociências da Universidade de Campinas (IG – UNICAMP) (Figura 18). Esta ferramenta possibilitou a aquisição do comportamento espectral dos minerais presentes tanto da bauxita fragmentada, quanto nos horizontes constituintes do solum nas diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Figura 18 – Espectrorradiômetro conectado ao computador para aquisição das curvas espectrais



Fonte: Biblioteca Espectral de Bauxita IG/Unicamp.

A análise espectral foi realizada no intervalo de 350 nm e 2500 nm, o que corresponde à faixa de imageamento do Sensor Aster, nas bandas de 1 a 9, desde o visível chegando até o infravermelho médio (SWIR), onde os principais minerais da bauxita possuem absorção.

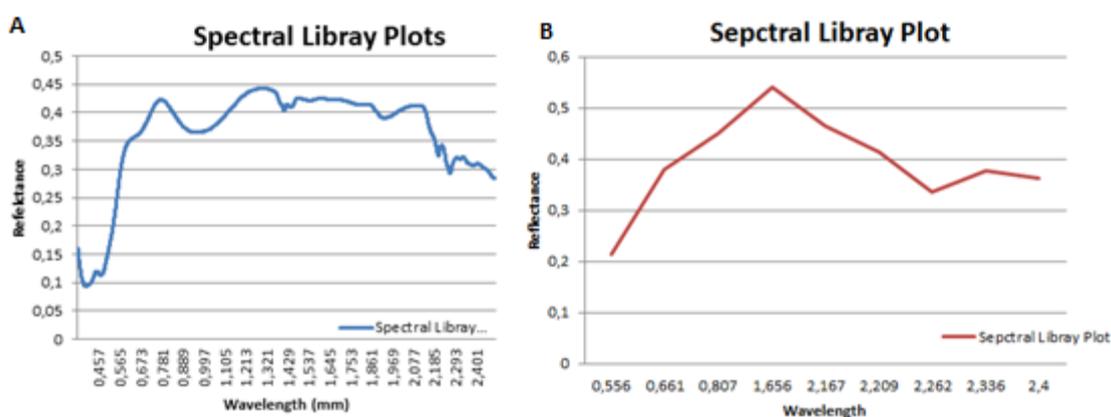
O tratamento das curvas espectrais ocorreu a partir do PRISM. O PRISM é uma extensão desenvolvida por Koklay (2011) que opera dentro da plataforma computacional, para processamento digital de imagens da terra, ENVI. Esta extensão fornece uma estrutura que auxilia tanto na aquisição laboratorial dos espectros, sejam eles no laboratório ou campo, eliminando as interferências causadas por estes ambientes.

Nesta pesquisa, utilizou-se a importação de espectros obtidos pelo *FieldSpec High-Resolution* para em seguida realizar uma correção da reflectância absoluta através da média entre espectros de uma mesma amostra e remoção do contínuo interativo para uma melhor análise espectral. Sabendo das funcionalidades que o PRISM oferece,

exportaram-se as curvas espectrais, após o prévio tratamento, em um arquivo do tipo *.Ascii* que é importado pelo ENVI e tido como Biblioteca Espectral.

Após a entrada dos dados em formato *.ascii* no ENVI, seguiu-se a metodologia proposta por Rocha e Souza Filho (2013) e Menezes e Almeida (2011), onde os espectros são reamostrados para uma resolução nanométrica compatível com as características do sensor a ser utilizado (Figura 19).

Figura 19. A- Espectros obtidos via espectrorradiômetro. B- Reamostragem dos espectros da imagem A para a resolução espectral do sensor Aster conforme Rocha e Souza Filho (2013) e Menezes e Almeida (2011).



A partir da obtenção das curvas espectrais finais (tratadas e reamostradas), referentes a cada amostra dos cinco pontos coletados, constitui-se a biblioteca espectral da bauxita em Espera Feliz que, posteriormente foi utilizada no processo de classificação supervisionada da imagem Aster para detecção da cobertura bauxítica na região estudada.

5.5. Processamento Digital de Imagem e Classificação Supervisionada

O pré-processamento da imagem incluiu a correção geométrica a partir de uma imagem Landsat OLI 8 correspondente e previamente registrada, visando remover os deslocamentos da imagem em relação à situação real. Em seguida, calibrou-se radiometricamente a imagem. Essa correção objetiva compensar erros radiométricos, defeitos de sensores, variações no ângulo de leitura e ruído do sistema para produzir uma imagem. Por fim, realizou-se a homogeneização dos tamanhos dos pixels da imagem, de modo a utilizar em todas as 9 bandas uma resolução de 15m. A homogeneização, ou reamostragem dos pixels, foi realizada através do módulo FLAASH do ENVI, seguindo o roteiro de conversão proposto por Santos (2009).

Assim sendo, foi necessário para a região de Espera Feliz, a criação de uma máscara de vegetação visando obter melhor resposta da associação espectral dos alvos (fragmentos de bauxita e horizontes pedoplasmados). A formação vegetal na área, com muitos cafezais, o período de aquisição da imagem, que corresponde a um período de chuvas na região, e a localização da área em domínios tropicais foram fatores que determinaram a realização desse procedimento. Esse, por sua vez, corresponde a retirada das áreas incluídas na máscara da área de interesse da classificação. A máscara da vegetação foi criada a partir da identificação da vegetação (nos seus variados níveis de clorofila), em seguida, a vegetação foi removida da imagem original a ser classificada.

A vegetação identificada foi descartada da análise no processo de classificação supervisionada por ser entendido que, além de ser um inconveniente no tempo de processamento da imagem, representa também um alvo a mais que coopera na confusão do classificador, além das considerações descritas no item 4.2 Fatores importantes para uso do Sensoriamento Remoto nas investigações geológicas. A vegetação rasteira foi conservada por se entender que ela possui uma maior associação entre a rocha e o solo, conforme demonstrado por Lima (2003) e também por ser esta ter sido coletada junto com os fragmentos de bauxita nos horizontes mais superficiais. Essa vegetação mostra-se no índice de vegetação misturada com a composição do solo local e, portanto portadora de baixos índices.

A identificação da vegetação foi realizada através das bandas 2 e 3 do sensor Aster, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, utilizadas na determinação do Índice de vegetação por Diferença normalizada (NDVI) conforme a equação 1:

$$NDVI = \frac{(NIR - VER)}{(NIR + VER)}$$

Equação 1 – índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Onde:

NDVI = índice de Vegetação por Diferença normalizada

NIR= Banda do Infravermelho próximo

VER= Banda do Vermelho

Depois de concluídas as etapas de processamento da imagem, realizou-se uma classificação supervisionada no ENVI utilizando a biblioteca criada no item 5.4.2 Espectroscopia de Reflectância e criação da Biblioteca Espectral, com auxílio do

algoritmo classificador SAM (*Spectral Angler Mapper*), que se mostra como portador dos melhores resultados. No classificador SAM, quanto menor for o ângulo entre a referência (biblioteca) e o pixel da imagem, maior será a acurácia da biblioteca e, tem-se assim, um excelente resultado.

Nessa etapa, foram realizadas classificações independentes, ou seja, buscou-se identificar um alvo tipo (como por exemplo, fragmentos de bauxita) em cada classificação com um limiar teste. Assim, testaram-se diferentes limiares, definidos por ângulos de radianos (variando de 0.19 a 0.25 para os fragmentos de bauxita). Esses ângulos foram inseridos no classificador de modo que todas as possibilidades de classificação fossem contempladas, ou seja, abaixo do limiar mínimo para cada alvo tipo, nenhum alvo foi identificado e, acima dos limiares máximos, houve uma grande confusão na classificação.

5.5 Trabalho de campo 2: validação da classificação

De posse das classificações, a validação das mesmas foi realizada em um segundo trabalho de campo. Foram visitados em torno de 90% dos pontos identificados na imagem, a partir dos quais buscou-se reconhecer ou não a presença da bauxita. Como muitas vezes a bauxita pode estar encoberta pelo sólum, foi utilizado um trado manual com haste de 150cm para averiguação de possíveis fragmentos em profundidade. A supervisão de campo também foi utilizada para verificar a consistência dos limiares escolhidos na classificação. Os resultados serão apresentados no CAPÍTULO 16. As ocorrências de bauxita de Espera Feliz, identificadas e confirmadas, foram analisadas a partir das características geológicas e geomorfológicas da área em que ocorrem, a partir do qual foi discutido o contexto de formação e distribuição da bauxita na região.

RESULTADOS

6.1 Caracterização mineralógica e espectroscópica dos materiais coletados

A análise mineralógica (Figura 20) revelou a presença majoritária de gibbsita nos fragmentos de bauxita em todos os pontos amostrados, corroborando com o que foi encontrado por Soares (2013) em seu estudo petrogenético. A intensidade dos picos de gibbsita, contudo, permite inferir a existência de dois grupos: i) um primeiro grupo (G1), constituído pelos fragmentos de bauxita localizados ao norte da área de estudo, pontos 1, 2 e 3, onde a intensidade de detecção não excede quatro mil pontos de contagem e, ii) um segundo grupo (G2), constituído pelos pontos 4 e 5, localizados a sul, onde todos os fragmentos amostrados apresentaram intensidade de detecção da gibbsita superior a dez mil pontos de contagem. Embora a intensidade dos picos não possa ser utilizada como um reflexo quantitativo direto, ela diz muito sobre a abundância do mineral no material analisado.

Além da gibbsita, foram identificados outros minerais que são igualmente comuns na bauxita: caulinita, goethita, hematita e quartzo. A intensidade de reflexão da caulinita e do quartzo permite considerar algumas diferenças mineralógicas nos fragmentos de bauxita. A primeira delas é que a intensidade dos picos de quartzo variou dentro dos próprios grupos apresentados anteriormente. No G1, constituído pelas bauxitas ao norte, apenas o ponto 1 apresentou detecção do quartzo no seu pico de maior difração ($d \sim 3,34$), ao passo que no G2, ao sul, todos os fragmentos apresentaram picos bem definidos e com intensidade moderada a forte. No caso específico da caulinita, a intensidade de todos os pontos amostrados é, geralmente, baixa e os picos possuem a base alargada, não sendo geometricamente perfeitos. Contudo, considerando a presença do mineral, apenas no G2 alguns fragmentos não apresentaram seu pico de maior difração ($d \sim 7,2$).

Diversos estudos reportam os motivos que levam a uma diferenciação mineralógica nas bauxitas (HOSE, 1960; VALENTON, 1974; CARVALHO, 1989; BARDOSSY E ALEVA, 1990; MELFI, 1997; BIGARELLA ET AL., 2007). Em primeiro lugar, é preciso considerar a mineralogia do material de origem. O quartzo, por

exemplo, é um mineral resistente e permanece mesmo em condições de forte intemperismo (GOLDISH, 1938). Assim, caso o material de origem seja rico em quartzo, se não houver uma remoção mecânica deste, ele tende a se acumular no manto de alteração. Além disso, existem variações composicionais e texturais nas rochas que podem justificar o fato do quartzo estar concentrado em bandas ou zoneamentos específicos, não se distribuindo equitativamente. Nesse caso, os produtos de alteração poderão conter mais ou menos desse mineral, considerando sua litoddependência.

No caso da caulinita, há mais de uma origem possível para o mineral (VARAJÃO ET AL., 2001). Em algumas bauxitas a caulinita está presente como residual daquela ainda não transformada em gibbsita. Nesse caso, a transformação do mineral primário seria inicialmente em caulinita e esta seria intemperizada para gibbsita (MILOT, 1970), formando a bauxita. Como essa transformação nunca é completa, algum conteúdo de caulinita pode permanecer. Num outro caso, o processo de degradação geoquímica da bauxita na porção superior do perfil laterítico envolveria a transformação da gibbsita em caulinita (o inverso do caso anterior) através do processo de ressilicificação (KELLER E CLARKE, 1984), também conhecido como caolinitização (DANGIC, 1985). Nesse processo, uma entrada de sílica e matéria orgânica pela vegetação provocaria a desestabilização da gibbsita e a caulinita seria neoformada (OLIVEIRA ET AL., 2013). Essa transformação se daria pelo desmembramento da couraça bauxítica e formação de um solo aluminoso. Assim, a depender de um caso ou de outro, a bauxita pode ser mais ou menos enriquecida em caulinita. Em se tratando dos fragmentos analisados e da maneira como eles se inserem no perfil laterítico, os resultados de DRX e os estudos de gênese da bauxita na região (SOARES, 2013) levam a crer que podem estar presentes os dois tipos de caulinita, mas que o segundo (caulinita formada pela degradação da gibbsita) mostra-se mais comum nos fragmentos. Isso porque o mineral parece, por sua identificação nos difratogramas, mal formado e porque logo acima dos fragmentos ocorre uma fácies de material pedogeneizado com enriquecimento em caulinita e cuja gênese infere-se estar associada à degradação da bauxita. Vale acrescentar que os fragmentos de G1 apresentaram melhor detecção da caulinita, acompanhada de menor detecção da gibbsita, o que sugere que estejam mais degradados que aqueles no G2.

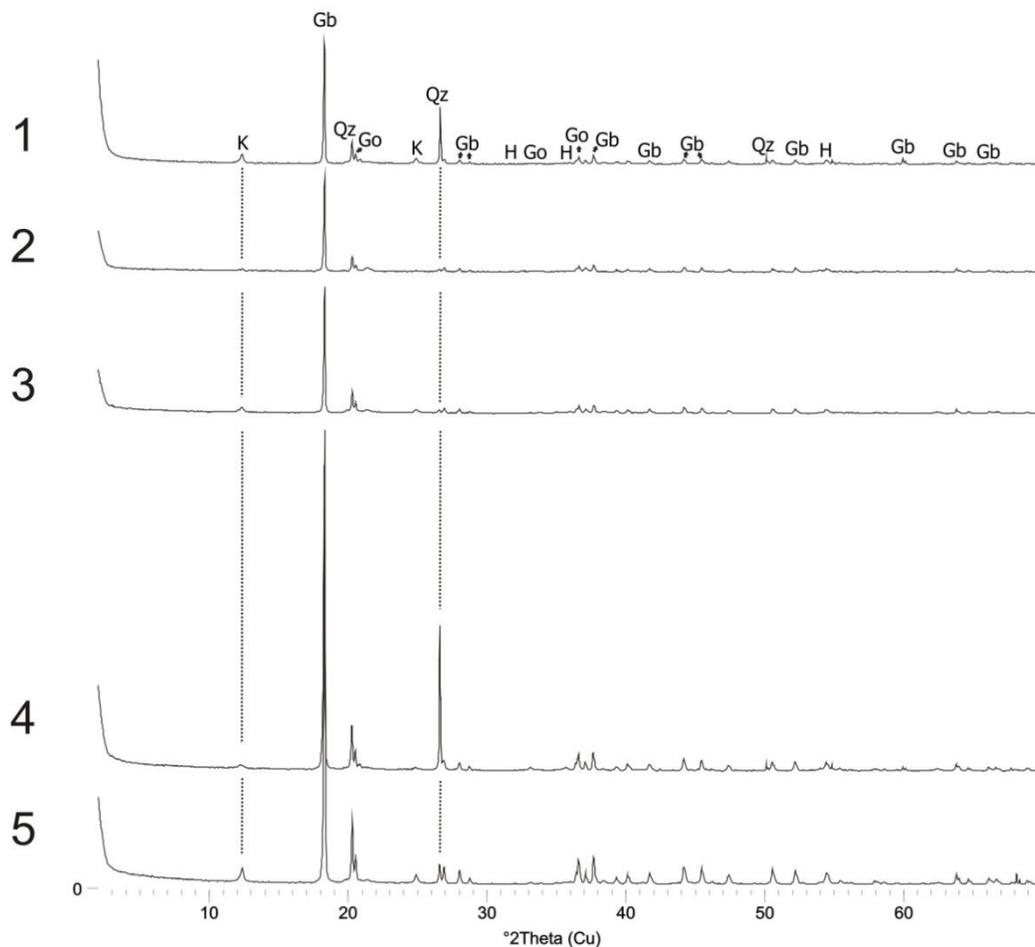


Figura 20 - Difratomogramas (radiação de Cu) representativos dos fragmentos de bauxita coletados nos pontos de 1 a 5. K = caulinita; Gb = gibbsita; Qz = quartzo; Go = goethita e H = hematita.

A resposta espectral obtida nos fragmentos de bauxita corrobora com a análise mineralógica. Inicialmente foram observados nas curvas de reflectância pontos de inflexão (picos de absorção) dos principais minerais identificados por DRX, considerando a faixa espectral de 350nm até 2500nm. Os principais pontos estão posicionados em 470nm, 950nm, 1441nm, 1930nm, 2210nm e 2270nm (Figura 21). Em 470nm e 950nm ficam evidenciados os minerais de composição ferruginosa, no caso das bauxitas em estudo, a goethita identificada pela difração. No ponto 1930nm destaca-se a presença de moléculas de água, considerando que a bauxita contém muitos minerais hidróxidos e, por isso, bastante hidratados. Para Rocha e Souza Filho (2013) e Meneses e Madeira Netto (2001), nessa faixa espectral a ocorrência de absorção entre 1400nm e 1900nm é diagnóstica para a presença de água e associação desta com os minerais aluminosos, de tal modo que sua presença indica a sua relação com outros minerais nesse mesmo sistema, estruturando assim a hidroxila. Em 2210nm fica evidenciada a presença de caulinita. Vale acrescentar que, embora a caulinita tenha sido apresentada

principalmente nesse ponto de inflexão, em algumas amostras ela ocorreu em 2207nm e 2208nm, indicando que, por causa da sua possível origem pela degradação da gibbsita, ela se apresenta estruturalmente mal formada e susceptível a tais variações. Em 2270nm fica evidenciado o ponto de inflexão da gibbsita, que se caracteriza como o ponto mais bem definido de toda a curva espectral. O único mineral que não foi evidenciado na espectroscopia foi o quartzo. Isso ocorre porque a sua faixa de absorção está no intervalo de 12000nm a 14000nm, já na faixa do Infravermelho Médio, após o intervalo de 2500nm utilizado nessa pesquisa.

Os grupos individualizados mineralogicamente, em decorrência da intensidade de detecção da gibbsita, revelam-se coerentes nas curvas de reflectância. Embora muito semelhantes em termos dos pontos de inflexão observados (geometria da curva), eles se diferenciaram na intensidade com a qual ocorreu essa reflectância. G1 apresentou menor percentual de reflectância que G2, geralmente 1 a 3% menor. Da mesma maneira, considerando o ponto da gibbsita, G2 apresentou picos de inflexão mais bem delineados que G1. Nesses termos, a caracterização espectroscópica revela, juntamente com a caracterização mineralógica, que os fragmentos presentes ao norte da área sugerem maior grau de degradação que aqueles situados ao sul.

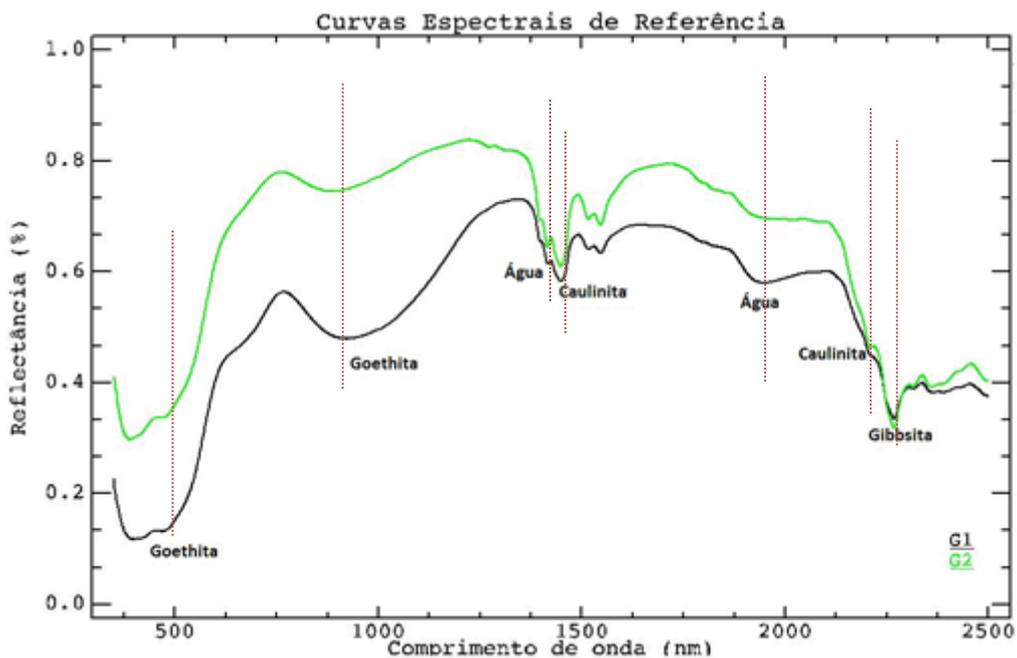


Figura 21 - Curvas espectrais representativas dos dois grupos (G1 e G2) de fragmentos de bauxita.

6.2 Distribuição espacial da bauxita

A identificação das possíveis ocorrências de bauxita, considerando a biblioteca espectral obtida, variou conforme o ângulo analisado, tal como determina o classificador SAM. Dentre os testes realizados, o ângulo 0.20° (radianos) foi aquele que apresentou os melhores resultados, registrando 178 pontos em que o comportamento espectral dos alvos na superfície se aproxima ao da bauxita (Figura 22). Acima de 0.20° foram identificados muitos pontos, causando confusão na classificação. Abaixo desse valor, com o ângulo 0.19° , foram identificadas 18 possíveis ocorrências distribuídas aleatoriamente pela imagem e com pouca associação com as ocorrências já conhecidas. Embora quanto menor o ângulo, maior a acurácia do classificador SAM, a classificação com o ângulo 0.20° foi avaliada como sendo a melhor para realizar a validação em campo, porque a partir dela as possibilidades de ocorrência foram ampliadas, aumentando o número amostral para averiguações. Além disso, foi essa classificação que indicou pontos muito próximos das ocorrências já conhecidas, reiterando a presença da bauxita nestes locais.

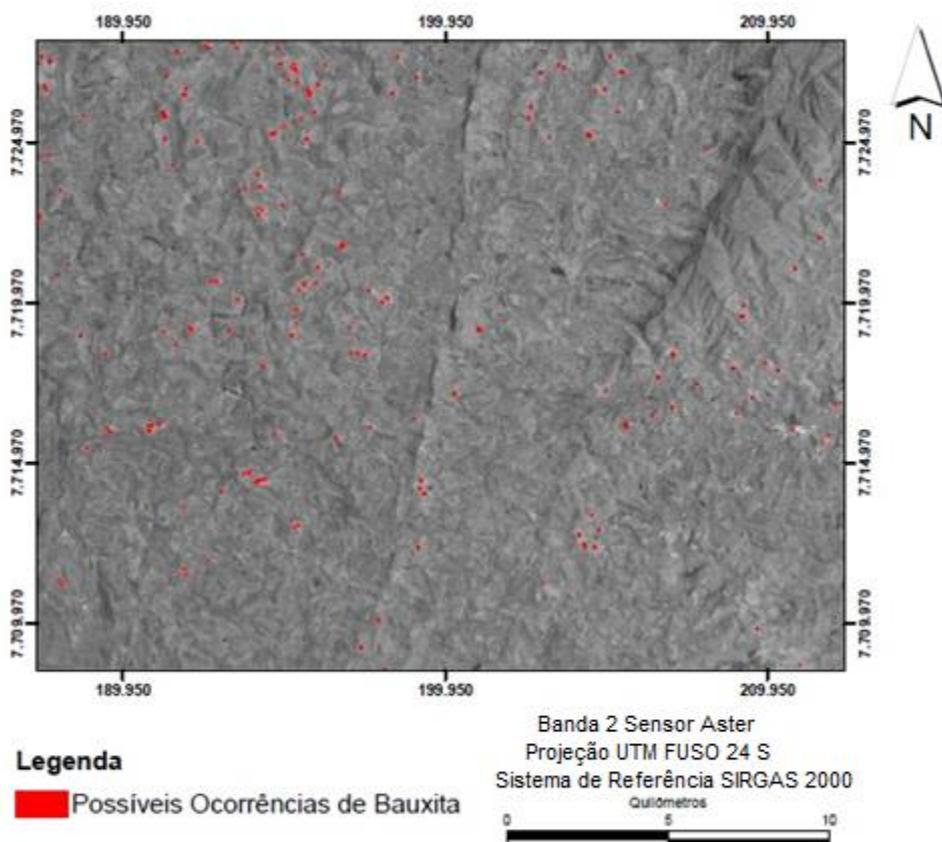


Figura 22 - Possíveis ocorrências de bauxita indicadas na classificação da imagem ASTER pelo classificador SAM com ângulo 0.020 .

De posse dos pontos com indicação de ocorrência, e a partir de um roteiro minucioso de campo, foram realizadas visitas em praticamente todas as áreas indicadas pela classificação. Apenas alguns pontos localizados em área de difícil acesso ou em propriedades particulares sem autorização de entrada não foram conferidos. Para todos esses, áreas próximas contendo pontos indicados pela classificação tiveram seus resultados extrapolados. As conferências buscaram observar a presença da bauxita através de cortes de estradas, pela presença de fragmentos na superfície, por escavações feitas pela agricultura (como as covas para o plantio do café) e por meio de tradagens (trado manual). Depois de validados os resultados, construiu-se a matriz de erros e verificou-se a exatidão global da classificação (Tabela 5)

Tabela 5 – Matriz de erros da classificação SAM.

	Ocorrência de Bauxita	Não Ocorrência de Bauxita	Total
Ocorrência de Bauxita	88	90	178
Não-Ocorrência	90	88	178
Total	178	178	356

Do total de possíveis ocorrências, 88 foram confirmadas, o equivalente a 49,5%, que confere a classificação um limiar de razoável a bom (MENEZES e ALMEIDA, 2011). É importante destacar que, os 50,5% considerados como sendo não-ocorrência de bauxita são explicados pela presença de uma paragênese aluminosa que é discutida mais adiante e, não necessariamente decorrente da confusão espectral na diferenciação dos materiais, como foi verificado na validação de campo. Nesse caso, os erros de comissão (aqueles atribuídos erroneamente como sendo bauxita) para a prospecção mineral tem a função de identificar áreas com potencial aluminoso, mesmo que não haja a ocorrência de depósitos de bauxita propriamente ditos. As áreas com ocorrências confirmadas foram indicadas em amarelo (Figura 23), ao passo que aquelas em que não houve a ocorrência foram identificadas em vermelho.

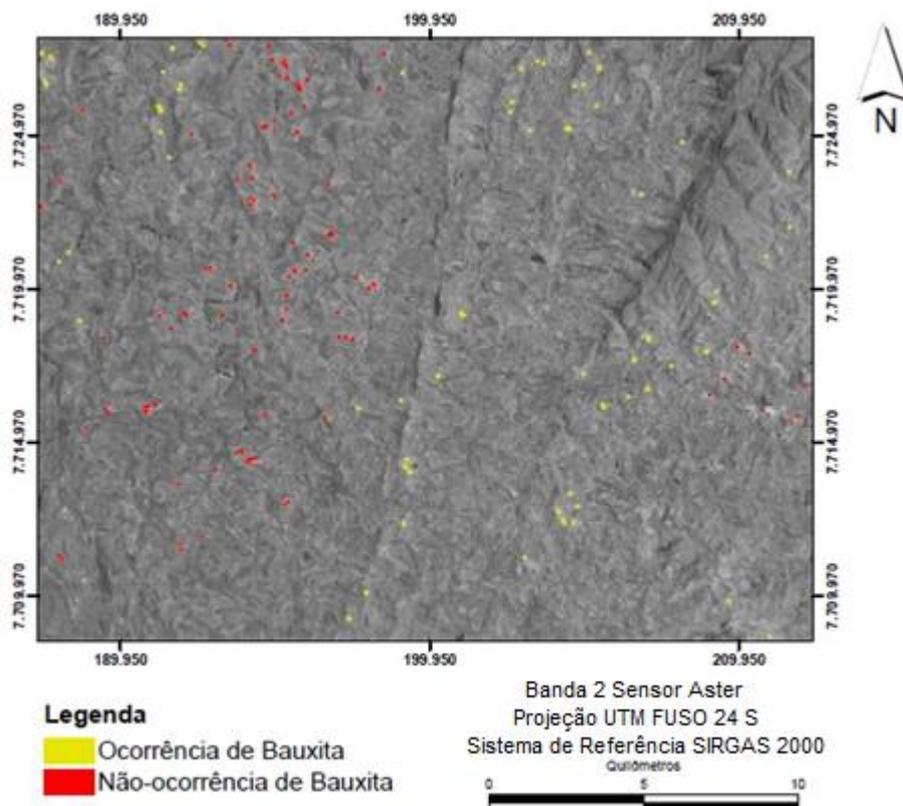


Figura 23 – Validação das possíveis ocorrências em campo com a indicação das ocorrências com bauxita, em amarelo, e das ocorrências sem bauxita, em vermelho.

Nas ocorrências confirmadas, a bauxita é muito semelhante àquela presente nos depósitos já conhecidos e utilizados na obtenção da biblioteca espectral. Elas ocorrem na forma de fragmentos, centimétricos a decimétricos, rosados a esbranquiçados, sotopostos a uma camada friável de solo ou, por vezes, aflorando na superfície (Figuras 24a, 24b e 24c). Esses afloramentos, contudo, parecem indicar que houve a exposição dos fragmentos por interferência antrópica, já que estão associadas a encostas com escavações ou agricultura. Além disso, próximo a esses locais, seja por gradagem ou por cortes de estrada, a bauxita pode ser identificada abaixo da camada de solo. Por tais considerações, é possível supor que em escala regional a bauxita ocorre na forma de um perfil laterítico clássico, com cobertura pedológica sobreposta em maior (~ 2m) ou menor (~ 1m) espessura. Da mesma maneira, conforme observado na imagem e em campo, essas ocorrências são isoladas e, mesmo que se aglomerem nas porções sudeste, nordeste e noroeste da imagem, não há uma conexão entre elas que permita reconhecer, na atualidade, uma superfície bauxítica contínua.

Nas ocorrências não confirmadas, há uma maior diversidade de materiais. Em muitos casos foi observada a presença de solos pouco profundos, constituídos na base por um saprólito de aspecto micáceo, muito friável (Figuras 24d e 24e). Pontuações esbranquiçadas de caulinita ocorrem intercaladas com paletas de muscovita, indicando serem produtos de sua alteração. Em alguns pontos, a muscovita ocorre com um material quartzo-arenoso, o que explica a identificação de possíveis ocorrências de bauxita em decorrência da associação aluminosa desse mineral. Outras ocorrências não confirmadas revelam a presença de um solo semelhante àquele encontrado sobre os fragmentos de bauxita, principalmente em termos de cor, mas sem conter, subsuperficialmente, tais fragmentos. Nestes casos, observa-se um saprólito rosado, caulínítico, com estruturas pseudomorfizadas típicas de bandamento gnaissico. As áreas em que a ocorrência da bauxita não foi verificada se distribuem ao longo de uma faixa sentido norte-sul na porção central da imagem e na extremidade leste da mesma. A gênese de solos a partir de rochas ricas em muscovita pode levar à formação de caulinita e gibbsita, aproximando essas coberturas da paragênese da bauxita.



Figura 24 - Fotos representativas dos materiais nos pontos de conferência, sendo a = fragmentos de bauxita coletados no interior do perfil por tradagem; b = fragmentos de bauxita dispersos na superfície em área de cultivo de café; c = horizonte de bauxita fragmentada no interior de um perfil exposto por corte de estrada; d = material saprolítico rico em mica e com pontuações esbranquiçadas de caulinita; e = furo de trado em material saprolítico micáceo com fragmentos grandes de quartzo na superfície.

7.1 Contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita

As ocorrências de bauxita validadas em campo não representam grandes aglomerados, mais sim ocorrências pontuais de significativa presença. A superposição desses com alguns mapeamentos temáticos permitiram compreender em que contexto eles se inserem na paisagem (Figura 25).

Em primeiro lugar, considerando o arcabouço litológico regional, a distribuição espacial das ocorrências de bauxita apresentou uma relação quase que exclusiva com as rochas da Suíte Caparaó (Figura 24, Tabela 2). Do total de 88 ocorrências, 89,8% está associado a rochas deste grupo, cujo litótipo predominante é, segundo Novo et al. (2011), um gnaiss ortoderivado, bandado, diorítico a granítico, de granulação média a fina de textura granoblástica com enclaves máficos centimétricos a métricos. O potencial de tais rochas em gerar a bauxita é dado, conforme Soares (2013), por uma paragênese constituída principalmente por feldspato potássico e plagioclásio, além de outros minerais como ortopiroxênio e hornblenda. O quartzo também está presente, porém como mineral residual da rocha a ser encontrado na bauxita, não sendo uma fonte de alumínio.

Além das rochas da Suíte Caparaó, algumas ocorrências podem estar relacionadas à presença do Gnaiss Tonalítico Manhuaçu. Trata-se de um ortognaiss granodiorítico, trondhjemítico a tonalítico, com partes de anfibólio-biotita-gnaiss, geralmente com orientação predominante N-S e de idade Neoproterozoica (HORN ET AL., 2007). Apenas 5 pontos identificados na porção sudeste da área de estudo foram relacionados a essa rocha. Contudo, é provável que um número maior de ocorrências esteja associado a ela, sobretudo aquelas indicadas em azul sob o Paragnaisse do Grupo Andrelândia. Isso porque a maioria das ocorrências não confirmadas de bauxita está relacionada ao Grupo Andrelândia, o que leva a crer que essas rochas não representaram, no contexto em que se insere a pesquisa, importantes protólitos formadores de bauxita. Nesses termos, a relação pontual de ocorrências no contato entre o Gnaiss Manhuaçu e o Paragnaisse Andrelândia pode representar muito mais uma inconsistência da escala do mapeamento disponível que uma relação exata entre a bauxita e sua rocha formadora.

Nos estudos regionais ou de mapeamento, é comum o apontamento de que a gênese de bauxitas na região sudeste de Minas Gerais esteja relacionada tanto a: i) gnaisses e granulitos da Suíte Caparaó quanto aos ii) paragnaisses granatíferos do Grupo Andrelândia (VALENTON ET AL., 1991; ROMANO & CASTAÑEDA, 2006; HORN ET AL., 2007; NOCE ET AL., 2007). Entretanto, quando se consideram os principais trabalhos de gênese em escala local (ROESER ET AL., 1984; LOPES, 1987; LOPES & BRANQUINHO, 1985; VALENTON & MELFI, 1988; BEISSNER, 1989; LOPES & CARVALHO, 1989; BEISSNER ET AL., 1997; SOARES, 2014), a maioria destaca ocorrências associadas às rochas charno-enderbíticas em “i”, inclusive fazendo referência a anfibolitos que foram, posteriormente, reinterpretados como charnokitos milonitizados de cor esverdeada. Assim, não parece conveniente supor que as rochas do Grupo Andrelândia não participem da gênese da bauxita, mas é permissível considerar que o maior potencial encontrado está relacionado às rochas da Suíte Caparaó, ou que pelo menos na região de Espera Feliz tenham sido elas as principais rochas produtoras de bauxita.

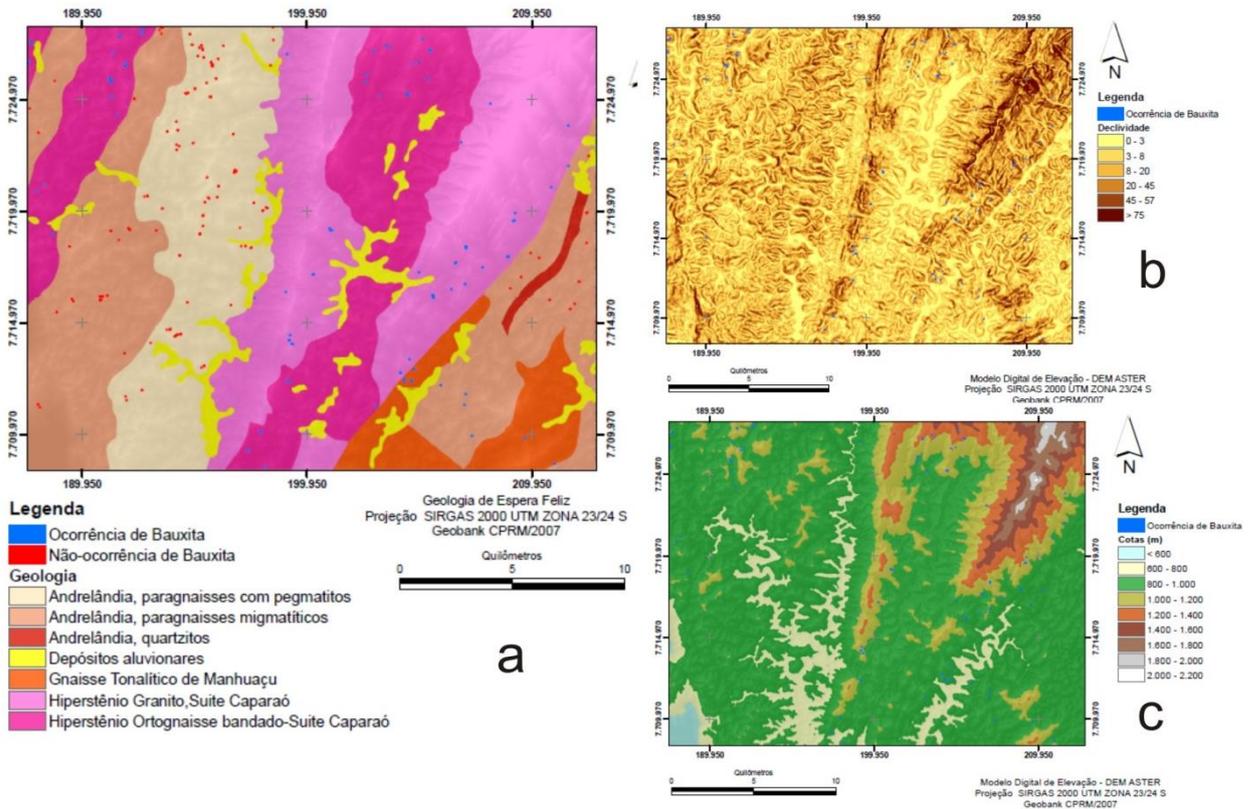


Figura 25 – Superposição das ocorrências de bauxita (em azul) no contexto litológico (a); de declividade (b) e hipsométrico (c).

Tabela 6 – Número de ocorrências em cada classe nos contextos apresentados na Figura 25.

	Categoria	Número ocorrências	% no total
GEOLOGIA	Ortognaisse Suíte Caparaó	42	47,8
	Granito Suíte Caparaó	37	42,0
	Gnaiss Tonalítico Manhauçú	4	4,5
	Paragnaisses Grupo Andrelândia	5	5,7
DECLIVIDADE¹ (%)	0 – 3	6	7,3
	3 – 8	23	18,0
	8 – 20	32	26,4
	20 – 45	22	31,4
	45 – 75	5	15,1
	75 >	0	1,8
ALTITUDE (m)	< 800	0	0
	800 - 1000	54	61,4
	1000 - 1200	27	30,6
	1200 - 1400	6	6,9
	1400 - 1600	1	1,1
	> 1600	0	0

1 – Classes de declividade propostas pela EMBRAPA, 1979

Em se tratando dos aspectos geomorfológicos, as ocorrências de bauxita situam-se principalmente nos terços médio e superior das encostas, com algumas ocorrências também em topos de morros. Ao contrário do que foi observado por Lopes (1987) na região de Miraí, o relevo em Espera Feliz não se restringe a morros e colinas em formato de meia-laranjas, considerando que, por influência das estruturas do maciço do Caparaó, existem muitos espigões e cristas alongadas, ambos orientados de acordo com a foliação principal das rochas. Assim, a bauxita situa-se tanto na porção superior dos mares de morros quanto de alguns espigões. De qualquer maneira, não foi constatado na imagem e no campo a presença da bauxita nos fundos de vale e sopés das encostas. Nesses compartimentos predomina a existência de coberturas argilosas profundas. A declividade corrobora com a posição dos depósitos na vertente, considerando que quase todas as ocorrências estão situadas em relevos ondulados (8-20%) ou forte ondulados (20-45%). Em se tratando da altitude, 61,4% das ocorrências estão localizadas entre 800 e 1000m, 30,6% entre 1200 e 1400m, 6,9% entre 1200 e 1400m e apenas uma ocorrência acima de 1400m.

7.2 Inserção das ocorrências identificadas em Espera Feliz na escala regional

A gênese de depósitos bauxíticos está relacionada à atuação de clima quente e úmido sobre rochas em áreas de relevo plano e bem drenado (TARDY, 1993). Tais rochas devem conter minerais cuja composição química envolve a presença de alumínio, considerando que será esse o elemento acumulado pela atuação do intemperismo intenso. As bauxitas encontradas na região de Espera Feliz se inserem nesse contexto e são, a exemplo das demais bauxitas conhecidas no território brasileiro (MELFI, 1997), produto dos processos de laterização.

As ocorrências identificadas, tratadas aqui como pequenos depósitos, na região de Espera Feliz através da classificação supervisionada encontram-se compartimentados na paisagem, à semelhança das ocorrências já conhecidas desde a década de 70 na região sudeste de Minas Gerais. Além disso, os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a altitude, declividade e posição na vertente em que os depósitos se situam são semelhantes aos demais depósitos. Tais semelhanças confirmam que a região em estudo se insere, em escala regional, no cinturão aluminoso discutido em Valenton et al. (1991). Ainda assim, existem algumas pequenas diferenças nas ocorrências identificadas em Espera Feliz, destacando-se: i) as bauxitas ocorrem também em cotas superiores aos 1.000m, ao passo que na escala regional a maior parte dos depósitos situa-se entre 700 e 900m; ii) as ocorrências são, em termos espaciais, menores e mais isoladas que as ocorrências das regiões de Cataguases, Mirai, Descoberto, Itamarati de Minas, etc; e iii) a bauxitização figura ter sido mais intensa nas rochas da Suíte Caparaó que no Grupo Andrelândia.

De acordo com os estudos para a porção sudeste de Minas Gerais, a bauxita teria se originado a partir de uma superfície aplainada Pré-Terciária esculpida pela erosão, denominada Sul-Americana. A esculturação dessa superfície expôs rochas em escala regional, como os gnaisses do Complexo Juiz de Fora, no qual se inserem tanto a Suíte Caparaó quanto o Grupo Andrelândia. Sob um sistema bem irrigado, com precipitação volumosa, drenagem eficiente e relativa estabilidade tectônica, as rochas teriam sido alteradas para profundos mantos intempéricos, com a bauxitização em porções contínuas da paisagem, criando superfícies bauxitizadas. Posteriormente, essa superfície teria sido compartimentada através da erosão associada a períodos de reativação tectônica. Assim, a disposição dos depósitos no sentido NW-SO seria um produto

conjunto da influência estrutural das rochas na sua gênese e do seu reposicionamento pela tectônica distensiva que afetou toda Plataforma Sul-Americana no Cenozóico.

No caso das bauxitas da região de Espera Feliz, sua distribuição concordante ao longo do terço superior das encostas e topos, bem como o caráter seccionado dos depósitos, levam a crer que também ocorreu a compartimentação de uma antiga superfície bauxítica. Contudo, o sensoriamento remoto mostrou que existem depósitos acima da cota de 1.000m. A concordância topográfica dos depósitos sempre foi um grande argumento para advogar a existência de uma paleosuperfície bauxitizada. O fato dos depósitos de Espera Feliz demonstrar uma maior variação de cotas indica que a bauxitização pode ter ocorrido numa superfície que já continha irregularidades topográficas. Isso porque o maciço do Caparaó constitui uma antiforme cuja idade remonta ao Brasiliano, ao passo que a formação da superfície regional seria no final do Mesozóico e início do Cenozóico. A bauxitização, neste caso, é atribuída por diversos autores como sendo um evento de maior expressão no Eoceno e, posteriormente, no Mioceno.

Os depósitos que hoje permanecem na paisagem de Espera Feliz seriam residuais, estando isolados pelo entalhe da drenagem, ou ainda degradados por processos de pedogênese. No primeiro caso, como dito, identifica-se o importante papel atribuído à reativação tectônica pós-Mesozóica, conforme destacado por Romano e Castañeda (2006). Soares (2013) enfatiza que a região de Espera Feliz apresenta nítidos indicadores da influência da neotectônica. Mesmo que alguns canais sigam a orientação preferencial da foliação (NNE), vários estão orientados conforme o padrão das fraturas (NW) responsáveis pelos principais lineamentos. Muitos canais formam corredeiras resultantes de deslocamentos verticais de blocos e muitas feições de meandros soerguidos são observadas nas vertentes. É provável que essa reativação tenha ocorrido durante o transcorrer do Cenozóico, quando todo o sudeste do Brasil foi tectonicamente reativado por pulsos (SAADI, 2005). Pesquisas em outros depósitos brasileiros destacam o importante papel que as reativações tectônicas no Oligoceno e Plioceno, sob clima seco, tiveram para a remobilização erosiva de depósitos. Zalán e Oliveira (2005) destacam que a máxima expressão da tectônica distensiva no sudeste brasileiro ocorreu entre 58-20 Ma, quando os horsts, formados paralelamente à linha da costa, foram erodidos, alimentando assim as bacias de Santos, Campos e do Espírito Santo.

A degradação geoquímica da bauxita é um importante mecanismo a considerar quando da necessidade de compreender porque os depósitos encontram-se em pontos

isolados em Espera Feliz. Neste caso, nenhuma ocorrência foi verificada sem que houvesse a associação com uma cobertura pedológica. Essa cobertura tem sido apontada como resultado da degradação superficial da bauxita a partir de um processo conhecido como ressilicificação, induzido pela colonização vegetal em momentos de alternância para climas mais úmidos (VAN DER MAREL, 1960 apud VALENTON, 1974; TEWARI, 1963; ALEVA, 1965; VALENTON, 1974; BOCQUIER ET AL., 1982; BOULANGÉ & BOCQUIER, 1983; BOULANGÉ, 1983; SÍGOLO & BOULANGÉ, 1987; VARAJÃO ET AL., 2001; OLIVEIRA ET AL., 2013). Muitos depósitos isolados na paisagem podem ter sido totalmente, ou quase totalmente, degradados pela pedogênese, transformando-se em solos. Essa degradação influenciou, inclusive, na resposta espectral dos alvos (G1 e G2 apresentados no ítem 3.1), considerando que algumas bauxitas encontram-se mineralogicamente mais ou menos transformadas.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que o Sensoriamento Remoto através da classificação das imagens do sensor ASTER é eficiente na identificação da distribuição das ocorrências de bauxita na região estudada, sobretudo quando associado à difração de raios-x como técnica de caracterização mineralógica. De acordo com os resultados encontrados, foi possível relacionar a gênese da bauxita em Espera Feliz com as rochas da Suíte Caparaó.

Dentre as principais conclusões, destaca-se:

- 1) As curvas de reflectância coletadas demonstram que, após a reamostragem dos espectros para compatibilidade no sensor, a gibbsita possui o ponto de absorção de referência (em 2270 nm) para a identificação dos corpos bauxíticos em toda a cena, de tal modo que outros minerais como caulinita e goethita aparecem como constituintes secundários.
- 2) O classificador SAM identificou com satisfação os materiais bauxíticos, sendo necessário atentar-se para o ângulo a ser definido. Corpos não-bauxíticos, porém com constituição aluminosa, foram igualmente detectados pelo classificador. Isso porque tais materiais são enriquecidos em muscovita, mineral aluminossilicático comum nos Paragnaisses do Grupo Andrelândia. Novos investimentos devem ser feitos para separar materiais aluminosos bauxíticos daqueles nos quais o alumínio encontra-se na estrutura de outros minerais que não a gibbsita. Esses testes devem sempre estar consorciados com averiguações de campo.
- 3) A sobreposição das ocorrências de bauxita sobre a geológica local mostra uma relação com as rochas da Suíte Caparaó. Isso demonstra um grande potencial dessas rochas como material de origem para a bauxita, corroborando com os estudos de Soares (2013).
- 4) A não confirmação da presença de bauxitas sobre os Paragnaisses do Grupo Andrelândia não significa que tais rochas não sejam fonte geradoras de minério de alumínio. Os resultados até então obtidos por esse estudo permitem considerar apenas que, possivelmente, na região de Espera Feliz elas não tenham sido bauxitizadas como os granulitos da Suíte Caparaó.

- 5) A maneira como as ocorrências estão localizadas na paisagem faz com que a bauxita na região de Espera Feliz integre o cinturão aluminoso do sudeste de Minas Gerais e confirma o modelo proposto por Lopes (1987). Em Espera Feliz, contudo, a presença de alguns depósitos em cotas altimétricas superiores pode ser um indicativo de que já no momento da formação da bauxita haviam irregularidades topográficas mais pronunciadas, tal como o maciço do Caparaó, que hoje constitui um conjunto de serras residuais alinhadas circundadas por um relevo do tipo mares de morro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEVA G.J.J. The buried bauxite deposit of Onverdacht, Surinam, South America. *Geologie en Mijnbouw*, n.4, p.45-58, 1965.

BARDOSSY, G.; ALEVA, G.J.J. Lateritic bauxite. Amsterdam Elsevier, p.624, 1990.

BARDOSSY, G. Paleoenvironments of laterites and lateritic bauxites: effect of global tectonism on bauxite formation. In: CHOWDNURY, M.K.R.; RAPHAKRISHMA, B.P.; VALDYANADHAN, R.; BANERJEE, PK.; RANGANATHAN, K. (Orgs.). *Laterisation processes; international seminar.. Rotterdam: ed.Balkema, 1981.p 287-294.*

BEISSNER, H. *Geologie, Mineralogie und Geochemie der Bauxite auf praekambrischen Basement-gesteinen im Gebiet von Astolfo Dutra, SW-lich Cataguases, Minas Gerais, Brasilien.* 1989. 228p .Tese. (Doutorado em Geologia), University of Hamburg, 1989.

BEISSNER, H.; CARVALHO, A.; LOPES, L.M. VALETON, I. The Cataguases bauxite deposit. In: CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.J.; LUCAS, Y. (Orgs.). *Brazilian Bauxites.* 1ª ed. São Paulo: ED USP/FAPESP/ORSTOM, 1997. p.195-208.

BIGARELLA J. J.; BECKER R. D.; SANTOS G. F. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.* 2ª ed. Florianópolis - SC :Editora UFSC, 2007.

BOCQUIER G.; BOULANGÉ B.; ILDEFONSE P.; NAHON D.; MULLER D. Transfers, accumulation modes, mineralogical transformations and complexity of historical development profiles. II International Seminar on Laterization, São Paulo, v.1, p.331-337, 1982.

BOULANGÉ B.; BOCQUIER, G. Le rôle du fer dans la formation des pisolites alumineux au sein des cuirasses bauxitiques latéritiques. *Sciences et Géologie*, v1, p.29-36, 1983.

BREUNIG, F.M. GALVÃO, L.S. FORMAGGIO, A.R. Couto, E.G. Combinação as bandas do SWIR e TIR do sensor ASTER para identificar solos quartzosos e áreas degradadas associadas. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, n.14, 2009, Natal. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal: INPE, 2009, 6p.

BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification.* 1ª ed., London: Mineralogical Society, 495p, 1980.

CARVALHO, A. *As Bauxitas no Brasil.* 1989. 134f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

CRÓSTA, Á. *Caracterização Espectral de Minerais de interesse à Prospecção Mineral e Sua Utilização em Processamento Digital de Imagens.* In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, n.6, 1993, Curitiba. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba: INPE, 1993, 8p.

DANGIC A. Kaolinization of bauxite: a study in the Vlasenica Bauxite area, Yugoslavia. I. Alteration of matrix. *Clay and Clay Minerals*, v3, n6, p.517-524, 1985.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula da 10ª Reunião Técnica de*

- Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).
- GOLDICH, S.S. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, n 46, p.17–58, 1938.
- HORN, A. H.; FARIA B.; GARDINI G. M.; VASCONCELLOS L.; OLIVEIRA M. R.. Mapa Geológico da Folha Espera Feliz SF.24-V-A-IV. Programa Levantamentos Geológicos Básicos Escala 1:100.000. ISBN 978-85-7499-044-6. CPRM/UFMG, Brasília, 2007, 63p.
- HOSE, H. R. The genesis of bauxite: the ores of aluminum. In: *Internacional Geological Congress*, n.21, 1960. *Proceedings*, v.16. p. 237-247, 1960.
- KELLER W.D. AND CLARKE, O.M.JR. Resilification of bauxite at the Alabama Street Mine, Saline County, Arkansas, illustrated by scanning electron micrographis. *Clays and Clay Minerals*, n.32, p.139–146, 1984.
- LOPES R.F.; BRANQUINHO J. A. Jazidas de bauxita da zona da Mata de Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C.E.S. (Orgs.). *Principais Depósitos Minerais Brasileiros - Metais Básicos Não Ferrosos, Ouro e Alumínio*. DNPM, Vol. 3, p.655-659, 1988.
- LOPES, L.M.; CARVALHO, A. Gênese da bauxita de Mirai, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, v.19, n.4, p. 462-469, 1989.
- LOPES, L.M.. A evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica da bauxita e materiais correlatos da região de Mirai. 1987. 120 f. Tese (Doutorado em Geociências)-Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.
- MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. 1ª ed. Brasília: Universidade de Brasília (UnB), 2001.
- MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. *Introdução ao Processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto*. 1ª ed. Brasília: UNB/CNPQ, 2011.
- MILLOT G. *Geology of Clays*. 1ª ed. New York: Springer, 425p, 1970.
- NAHON, D.; TARDY, Y. The Ferruginous Laterites. In: Butt, C.R.M.; Zeegers, H. (Orgs), *Regolith, Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains*. Elsevier Science Publishers, p.41-54, 1992.
- NOCE, C. M.; COSTA, A. G.; PIUZANA, D.; VIEIRA, V. S.; CARVALHO, C. M. Mapa Geológico da Folha Manhauçu SF.23-X-B-III. Programa Levantamentos Geológicos Básicos Escala 1:100.000. CPRM/UFMG. Brasília, 2007.
- NOVO, T.A.; NOCE, C.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.P. Rochas granulíticas da Suíte Caparaó na região do Pico da Bandeira: embasamento oriental do Orógeno Araçuaí. *Revista Geonomos*, v.19, n.2, p.70-77, 2011.
- OLIVEIRA, F.S.; VARAJÃO, A.F.D.C.; VARAJÃO, C.A.C.; BOULANGÉ, B. A comparison of properties of clay minerals in isalteritic and in degraded facies. *Clay Minerals*, V.48, p.41-54, 2013.
- ROCHA, B.M.; SOUZA FILHO, C.R. Geração de bibliotecas espectrais de depósitos de bauxita brasileiros e exemplos de uso para a prospecção de minérios de alumínio por sensoriamento remoto orbital. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, n.16,

2013, Foz do Iguaçu. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu: INPE, 2013, 8p.

RODRIGUES, K. R. Geoambientes e solos em ambientes altimontanos nos Parques do Itatiaia e Caparaó, MG. 2011. 132f. Tese (Doutorado em Solos) - Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

ROESER, H.; ROESER, U.G.; GROSSI, AW.R.; FLORES, J.C.C. Contribuição à origem das jazidas de bauxita de Cataguases, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, n.33, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, SBG, 1984.

ROMANO, A. W. & CASTAÑEDA, C. A. Tectônica Distensiva Pós-Mesozóica No Condicionamento Dos Depósitos De Bauxita Da Zona Da Mata Mineira. Revista Geonomos V.14, n.1, p. 1-5, 2006.

RUHE, R.V. Geomorphology. 1ª ed. Boston: Houghton Mifflin, 255p, 1975.

SAADI, A.; BEZERRA, F.H.R.; COSTA, R.D.; IGREJA, H.L.S.; FRANZINELLI, E. Neotectônica da Plataforma Brasileira. In: SOUZA C.R.G., SUGUIO, K., OLIVEIRA A.M.S., OLIVEIRA P.E. (Orgs.) Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, 2005, p.211-234.

SANTOS, T.V. Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais. 2009. 96f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Meteorologia e Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SIGOLO J.B.; BOULANGE B. Caracterização das fácies de alteração de uma toposequência no maciço alcalino de Passa Quatro, MG. Revista Brasileira de Geociências, v.17, p.269-275, 1987.

SOARES, C.C.V. Gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica da bauxita de Espera Feliz, MG. 2013. 104f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

TARDY, Y. Pétrologie des laterites et des sols tropicaux. 1ª ed. Paris: Masson, 416 p, 1993.

TARDY, Y.; KOBILSEK, B.; PAQUET, H. Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites: The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. Journal African Earth Science, v.1, p.283-295, 1991.

TEWARI G. P. Occurrence of kaolinite in association with iron-pan. Nature, n.198, p.1019, 1963.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA- UFV. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Viçosa, 2010. 49p.

VALENTON, I. Bauxites. Elsevier, Development in Soil Science, v. 1, 213 p., 1972.

VALENTON, I. Resilification at the top of the foreland bauxite in Surinam and Guyana. Mineralium Deposit, n.9, p169-173, 1974.

VALETON, I.; MELFI, A.J. Distribution pattern of bauxites in the Cataguases area (SE Brazil), in relation to Lower Tertiary paleogeography and younger tectonics. *Science Géologique Bulletin*, v.41, n.1, p.85-98, 1988.

VARAJÃO A.F.D.C., GILKES R.J. AND HART R.D. The relationships between kaolinite crystal properties and the origin of materials for a Brazilian kaolin deposit. *Clay and Clay Minerals*, v.49, p.44-59, 2001.

VARAJÃO, C. C. MENEZES, P.R. Detecção de depósitos bauxíticos em coberturas Lateríticas através de imagens TM, Sinclinal do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, n5, 1988, Natal. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal: INPE, 1988, 5p.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J.A.B. Origem e evolução estrutural do sistema de riftes cenozóicos do sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*. V.13, n.2, p. 269-300, 2005: 269-300.

ANEXOS

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO DA BAUXITA NA REGIÃO DE ESPERA FELIZ (MG/ES)¹

1. Introdução

A bauxita é um produto resultante do intemperismo intenso sobre rochas e sedimentos na superfície terrestre (BIGARELLA ET AL., 2007). Desde seu descobrimento na região de Le Baux, França (CARVALHO, 1989), ela vem sendo utilizada como fonte de extração de alumínio, justamente por ser esse o principal elemento químico em sua composição. Mineralogicamente, o alumínio ocorre na forma de gibbsita, um hidróxido associado ao intemperismo de minerais aluminossilicáticos (feldspatos, micas, etc) e argilominerais (caulinita). Outros minerais também são comuns na bauxita, sendo, face ao seu uso metalúrgico, considerados impurezas, como as espécies de ferro (hematita e goethita, principalmente), os óxidos de titânio e o quartzo (VARAJÃO E MENEZES, 1988).

As regiões intertropicais são aquelas que apresentam as condições ambientais necessárias à formação da bauxita (BARDOSSY E ALEVA, 1990; TARDY ET AL., 1991; TARDY, 1993). Isso ocorre em virtude da presença de climas com elevada temperatura e umidade, em quantidade e intensidade suficientes para promover o alto intemperismo das rochas. Quando presente em regiões de climas temperado ou desértico, a bauxita é muitas vezes compreendida como produto de um contexto climático pretérito, preservada na paisagem como um componente paleoambiental (BARDOSSY, 1981). Assim, além do interesse econômico, a bauxita é um importante indicador de evolução da paisagem.

Embora sejam muitas as etapas envolvidas na caracterização de um depósito bauxítico, como o reconhecimento de sua gênese, dimensão e possibilidades de uso, nenhuma delas precede a descoberta e localização do depósito. Essa descoberta de ocorrências é, a priori, resultado das atividades de pesquisa mineral através de trabalhos de campo, geralmente muito exaustivos e com elevado custo de operação. Como se trata de uma etapa inicial e da qual depende a continuidade dos investimentos, seus resultados terão efeitos em todas as etapas subsequentes, como, por exemplo, na

¹ Artigo Submetido ao Journal of South American Earth Sciences (Qualis Geografia A1 e Qualis Ciências Ambientais B1) em 21/07/2015.

identificação do potencial da área para exploração (retirada), diminuindo a possibilidade de investimentos errôneos.

Objetivando otimizar a descoberta de possíveis reservas minerais sem onerar o processo de investigação, diversos estudiosos vem se dedicando ao emprego das geotecnologias na identificação e localização de potenciais ocorrências. Ferramentas de caráter tecnológico, como o sensoriamento remoto, ganharam destaque para esse fim, basicamente porque permitem incorporar escalas regionais e porque melhoram o tempo de resposta entre a pesquisa e a possibilidade de tomada de decisão. Rocha e Souza Filho (2013) e Crósta (1993), por exemplo, demonstraram o potencial do sensoriamento remoto, em especial da espectroscopia, na identificação mineralógica de formações superficiais. Os autores concluíram que se trata de uma ferramenta com boa relação custo-benefício, uma vez que os dados obtidos remotamente por sensores multiespectrais, como o Landsat e o ASTER, ofereceram resultados satisfatórios. No mesmo sentido, Breuning et al. (2009) expõe que o sensoriamento remoto é passível de ser utilizado na identificação mineralógica porque os minerais presentes nas coberturas superficiais exibem bandas de absorção bem definidas no visível, infravermelho próximo (Visible/NearInfrared – VNIR) (goethita e hematita) e no infravermelho de ondas curtas (ShortwaveInfrared – SWIR) (caulinita e gibbsita), permitindo a discriminação de paragêneses mineralógicas.

Dentre os benefícios oferecidos pelo sensoriamento na identificação de depósitos bauxíticos, está a possibilidade de verificar ocorrências em áreas cujos depósitos encontram-se isolados uns dos outros, representando coberturas residuais e, por isso, com distribuição difícil de ser compreendida apenas por estudos de campo localizados. Neste contexto se insere a região sudeste de Minas Gerais, onde ocorre um cinturão aluminoso orientado sentido NE-SW, no qual as principais ocorrências de bauxita são conhecidas nos municípios de Cataguases, Mirai, Descoberto e Itamarati de Minas. Estudos realizados neste cinturão destacaram a presença de depósitos em cotas variando de 700 a 900 metros de altitude (LOPES, 1987; 1989), enfatizando sua localização pontual e compartimentada (ROMANO E CASTAÑEDA, 2006). Na região de Espera Feliz, em específico, os depósitos são pouco conhecidos e não foram, até o momento, objeto de estudos científicos. Apenas uma das ocorrências teve sua gênese detalhada por Soares (2013), que revelou se tratar de um produto da alteração de um gnaiss de fácies granulito, especificamente da série charnokítica, denominado charno-enderbito. Diante disso, considerando a contribuição que o sensoriamento remoto pode trazer para o

conhecimento dos depósitos bauxíticos e avaliando a importância da prospecção de novas ocorrências, este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição da bauxita na região de Espera Feliz, considerando não só a espacialização das ocorrências, mas também sua relação com o contexto geológico-geomorfológico.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A denominada Região de Espera Feliz compreende um quadrante limitado pelas coordenadas 7727970 N 186950 O e 7708970 N 212450 O, envolvendo um conjunto de municípios inseridos na divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, próximo à Serra do Caparaó (Figura 1).

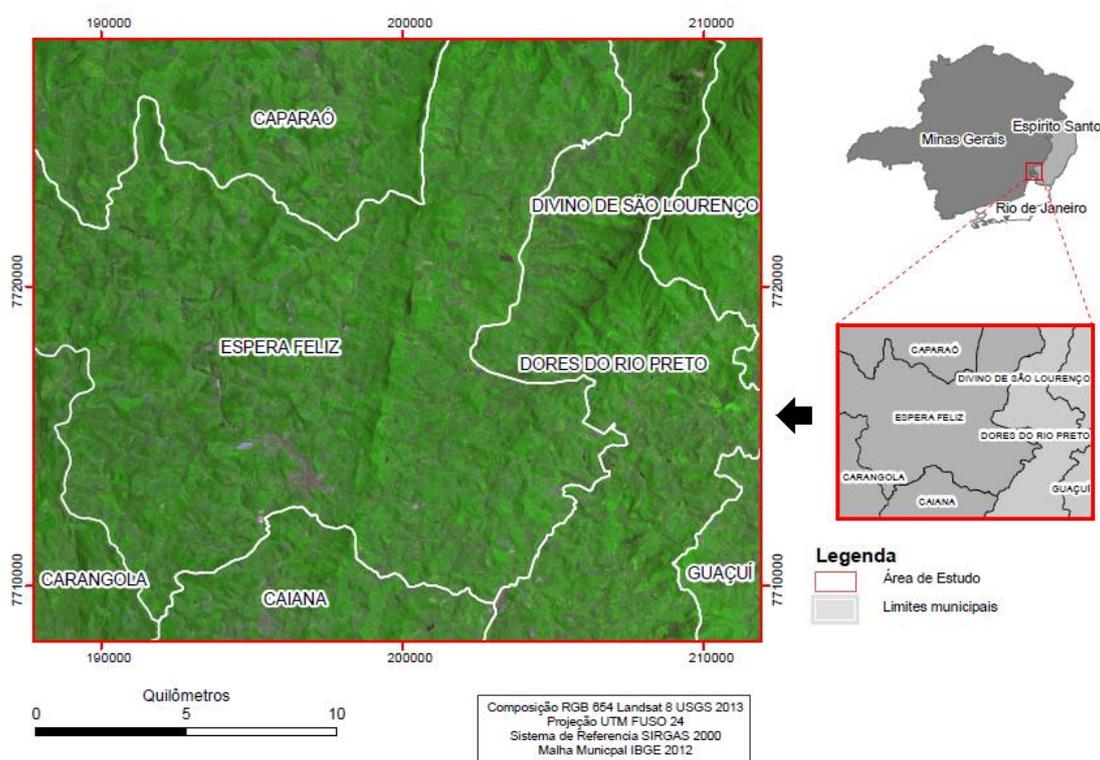


Figura 1. Localização da área de estudo, denominada Região de Espera Feliz (MG/ES), delimitada pelo quadrante vermelho.

O relevo na área de estudo possui forte controle litoestrutural. Observam-se serras com espigões alongados segundo a foliação principal NNE-SSW. Na Serra do Caparaó, as elevações superam 2800m, sendo bordejada por terrenos com cotas entre 600 e 1100m. Nesse intervalo, morros ondulados a suavemente ondulados são separados entre si por vales planos entulhados por sedimentos. O substrato rochoso é composto em grande parte por gnaisses e granitos pré-cambrianos do Complexo Juiz de Fora, mais especificamente da Suíte Caparaó e Grupo Andrelândia (HORN ET AL., 2007), além da

presença do Gnaisse Tonalítico Manhuaçu. Ocorrem Latossolos Vermelho-Amarelo nos morros e Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos nas vertentes mais íngremes. Nas baixadas, predominam Gleissolos e Neossolos Flúvicos (RODRIGUES, 2011). Em termos da cobertura vegetal, alguns remanescentes de Floresta Ombrófila Densa estão presentes no entorno do Parque Nacional do Caparaó, embora grande parte tenha sido desmatada para o plantio de café, que domina na paisagem. Nas partes altas do Parque ocorrem campos de altitude.

2.2 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos iniciais envolveram a realização de uma pesquisa bibliográfica e um levantamento dos produtos cartográficos digitais disponíveis para a área estudada. Esses produtos são: i) Mapa Geológico Folha Espera Feliz SF 24-V-A-IV da CPRM na escala de 1:100.000, acompanhada de relatório; ii) SIG geológico na escala de 1:50.000 disponibilizado pelo Geobank da CPRM e iii) imagem multiespectral do Sensor Aster, referente à órbita 216 e ponto 74 do dia 15/04/2008, nos canais 1 a 3, com resolução espacial de 15m e os canais 4 a 9 com resolução espacial de 30m, e imagem de radar deste mesmo sensor com modelo digital de elevação, sendo essas imagens disponibilizadas pelo Laboratório de Espectroscopia de Reflectância da Universidade Estadual de Campinas (LER/Unicamp) e Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), respectivamente. A escolha do sensor Aster é justificada por que, este sensor apresenta-se, em termos do que tem sido apontado pela literatura, como portador dos melhores resultados para o estudo espectral de ocorrências mineralógicas em coberturas superficiais, sobretudo considerando a existência de bandas espectrais capazes de identificar materiais de composição aluminosa.

De posse do material cartográfico, foi realizada a primeira investigação de campo com o objetivo de fazer um reconhecimento, *in locu*, do arranjo ambiental da área de estudo e para a amostragem de áreas com depósitos bauxíticos já conhecidos. Com base em pesquisas exploratórias realizadas pela empresa EDEM Projetos e Mineração, já haviam sido documentadas algumas ocorrências em pontos isolados nessa região. Com o apoio da empresa, essas áreas foram visitadas e cinco delas foram selecionadas para amostragem (Figura 2). Conforme apontam Nahon e Tardy (1992), a fácies de alteração da bauxita mais próxima à superfície e, por isso, mais susceptível de ser identificada pelos sensores orbitais, seria a bauxita fragmentada, situada logo abaixo de uma camada de material pedogeneizado, o *sólum*. Atendendo a essa concepção,

foram coletadas amostras de bauxita fragmentada nas cinco ocorrências conhecidas, numa profundidade média de 1,5 metros. Todos os materiais coletados foram, posteriormente, caracterizados do ponto de vista espectral e mineralógico, conforme descrito a seguir.

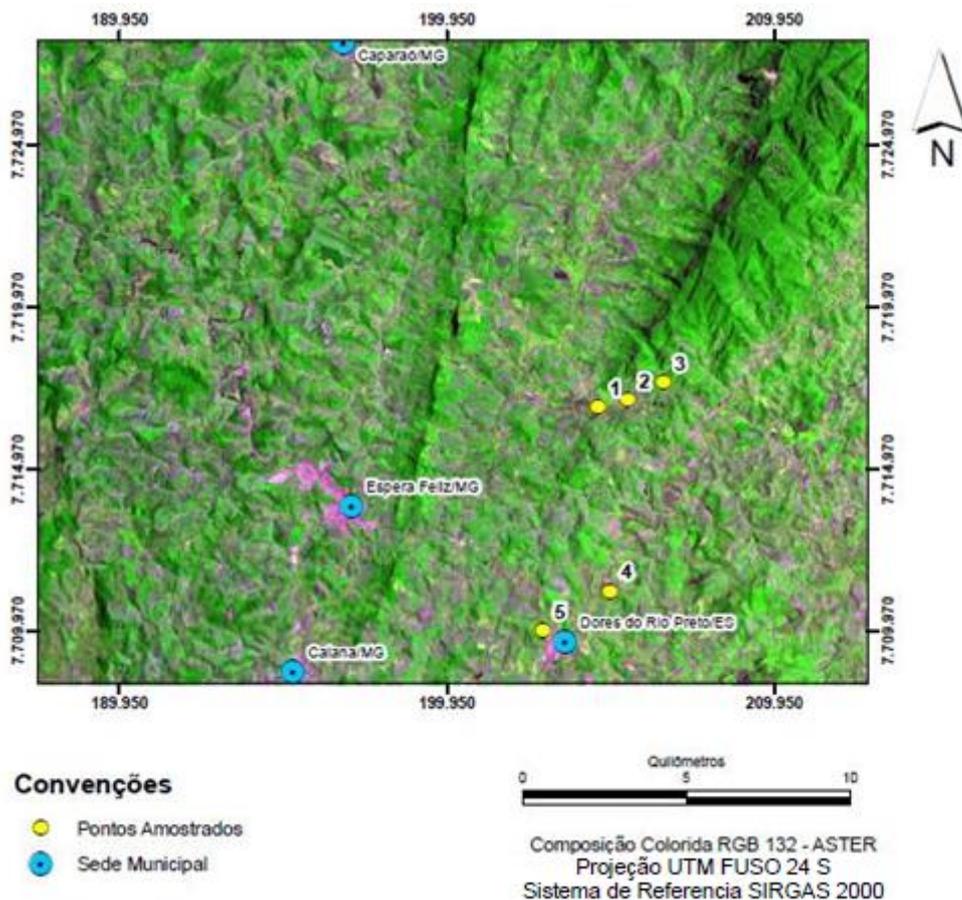


Figura – 2. Localização dos pontos amostrados na área de estudo

A caracterização espectral teve como objetivo a obtenção de curvas que foram, posteriormente, utilizadas na classificação da imagem orbital. As curvas espectrais foram adquiridas com o uso do Espectroradiômetro FieldSpec High-Resolution, que forneceu o comportamento espectral dos minerais presentes nas amostras de bauxita no intervalo de 350nm à 2500nm; correspondente à faixa de imageamento do Sensor Aster, nas bandas de 1 a 9. Os padrões de absorção dos minerais observados foram comparados com aqueles reportados pela literatura. Após a obtenção dessas curvas de referência, foi realizada uma correção da reflectância absoluta através da média entre espectros de uma mesma amostra, considerando que cada amostra foi lida três vezes no aparelho. Também foi realizada a remoção do contínuo interativo para uma melhor análise espectral. Tanto a média quanto a remoção foram realizadas no algoritmo

PRISM. Em seguida, as curvas espectrais finais foram exportadas para o formato *.Lib* e, posteriormente, reamostradas no Software ENVI, sendo utilizadas na classificação supervisionada.

A caracterização mineralógica foi realizada com o objetivo de auxiliar a identificação de quais seriam os minerais presentes na bauxita e, por isso, responsáveis pelas curvas de reflectância obtidas. A análise foi feita através da Difração de Raios-X (DRX). As 5 amostras, referentes aos fragmentos dispersos na superfície, foram pulverizadas em moinho de disco orbital e, em seguida foram dispostas em lâminas de vidro e levadas ao Difratorômetro Empyrian da Panalytical com radiação de $\text{CuK}\alpha$, no intervalo 2θ de 2 a 70° para a fração pó total. A velocidade de leitura foi de $0,6^\circ/\text{min}$. Os difratogramas foram interpretados através do software X'Pert High Score Plus e através de padrões da literatura (BRINDLEY E BROWN, 1980).

Uma vez obtidas as curvas espectrais e identificados os minerais responsáveis por elas, foi realizada a classificação supervisionada da imagem conforme a metodologia proposta por Rocha e Souza Filho (2013) e Menezes e Almeida (2011). Foi realizada, inicialmente, o pré-processamento da imagem. Esta etapa incluiu a correção geométrica a partir de uma imagem Landsat OLI-8, correspondente e previamente registrada, visando remover os deslocamentos da imagem em relação à situação real, ocasionada pelos movimentos de rotação da Terra. Em seguida, a imagem foi calibrada radiometricamente para compensar erros radiométricos, ou os defeitos do sensor, variações no ângulo de leitura e ruído do sistema produtor da imagem. Por fim, foi realizada a homogeneização dos tamanhos dos pixels da imagem, a fim de utilizar em todas as 9 bandas uma resolução espacial de 15m, garantindo boa informação espectral e espacial. A homogeneização dos pixels foi realizada através do módulo FLAASH do ENVI, seguindo o roteiro de conversão proposto por Santos (2009).

Depois de concluídas as etapas de pré-processamento da imagem, foi realizada uma classificação supervisionada no ENVI, utilizando a biblioteca criada e com auxílio do algoritmo classificador SAM (*Spectral Angler Mapper*). No classificador SAM, quanto menor for o ângulo entre a referência (biblioteca) e o pixel da imagem, maior será a acurácia da biblioteca, melhorando os resultados encontrados. Nessa etapa, foram realizadas classificações independentes, ou seja, foi identificado um alvo tipo (como por exemplo, fragmentos de bauxita) em cada classificação com “ângulo limiar teste”. Para tal, foram testados diferentes limiares, definidos por ângulos de radianos, que no caso dos fragmentos de bauxita variaram de 0.19 a 0.25. Esses ângulos foram inseridos no

classificador de modo que todas as possibilidades de classificação fossem contempladas, ou seja, abaixo do limiar mínimo para cada alvo tipo nenhum alvo foi identificado e, acima dos limiares máximos, houve uma grande confusão na classificação. Uma vez obtida a classificação da imagem, expondo pontos de possíveis ocorrências de bauxita, foi realizado um segundo trabalho de campo para validação. Esse campo consistiu na visita aos principais pontos identificados para verificação da presença de bauxita no perfil laterítico ou não. Essa verificação se deu tanto em cortes de estradas e exposições em cascalheiras, quanto por tradagem até o limite de 1,5m de profundidade. Os materiais encontrados foram descritos e fotografados.

A partir da classificação já validada, as bauxitas confirmadas foram relacionadas com seu contexto geológico e geomorfológico. O contexto geológico considerou os principais litótipos presentes na respectiva formação geológica, ao passo que o contexto geomorfológico considerou aspectos relacionados à cota altimétrica, declividade e posição na vertente, quais sejam topo de morro, encosta ou sopé (RUHE, 1975).

3. Resultados e Discussão

3.1 Caracterização mineralógica e espectroscópica dos materiais coletados

A análise mineralógica (Figura 3) revelou a presença majoritária de gibbsita nos fragmentos de bauxita em todos os pontos amostrados, corroborando com o que foi encontrado por Soares (2013) em seu estudo petrogenético. A intensidade dos picos de gibbsita, contudo, permite inferir a existência de dois grupos: i) um primeiro grupo (G1), constituído pelos fragmentos de bauxita localizados ao norte da área de estudo, pontos 1, 2 e 3, onde a intensidade de detecção não excede quatro mil pontos de contagem e, ii) um segundo grupo (G2), constituído pelos pontos 4 e 5, localizados a sul, onde todos os fragmentos amostrados apresentaram intensidade de detecção da gibbsita superior a dez mil pontos de contagem. Embora a intensidade dos picos não possa ser utilizada como um reflexo quantitativo direto, ela diz muito sobre a abundância do mineral no material analisado.

Além da gibbsita, foram identificados outros minerais que são igualmente comuns na bauxita: caulinita, goethita, hematita e quartzo. A intensidade de reflexão da caulinita e do quartzo permite considerar algumas diferenças mineralógicas nos fragmentos de bauxita. A primeira delas é que a intensidade dos picos de quartzo variou dentro dos próprios grupos apresentados anteriormente. No G1, constituído pelas

bauxitas ao norte, apenas o ponto 1 apresentou detecção do quartzo no seu pico de maior difração ($d \sim 3,34$), ao passo que no G2, ao sul, todos os fragmentos apresentaram picos bem definidos e com intensidade moderada a forte. No caso específico da caulinita, a intensidade de todos os pontos amostrados é, geralmente, baixa e os picos possuem a base alargada, não sendo geometricamente perfeitos. Contudo, considerando a presença do mineral, apenas no G2 alguns fragmentos não apresentaram seu pico de maior difração ($d \sim 7,2$).

Diversos estudos reportam os motivos que levam a uma diferenciação mineralógica nas bauxitas (HOSE, 1960; VALENTON, 1974; CARVALHO, 1989; BARDOSSY E ALEVA, 1990; MELFI, 1997; BIGARELLA ET AL., 2007). Em primeiro lugar, é preciso considerar a mineralogia do material de origem. O quartzo, por exemplo, é um mineral resistente e permanece mesmo em condições de forte intemperismo (GOLDISH, 1938). Assim, caso o material de origem seja rico em quartzo, se não houver uma remoção mecânica deste, ele tende a se acumular no manto de alteração. Além disso, existem variações composicionais e texturais nas rochas que podem justificar o fato do quartzo estar concentrado em bandas ou zoneamentos específicos, não se distribuindo equitativamente. Nesse caso, os produtos de alteração poderão conter mais ou menos desse mineral, considerando sua litodependência.

No caso da caulinita, há mais de uma origem possível para o mineral (VARAJÃO ET AL., 2001). Em algumas bauxitas a caulinita está presente como residual daquela ainda não transformada em gibbsita. Nesse caso, a transformação do mineral primário seria inicialmente em caulinita e esta seria intemperizada para gibbsita (MILOT, 1970), formando a bauxita. Como essa transformação nunca é completa, algum conteúdo de caulinita pode permanecer. Num outro caso, o processo de degradação geoquímica da bauxita na porção superior do perfil laterítico envolveria a transformação da gibbsita em caulinita (o inverso do caso anterior) através do processo de ressilicificação (KELLER E CLARKE, 1984), também conhecido como caolinitização (DANGIC, 1985). Nesse processo, uma entrada de sílica e matéria orgânica pela vegetação provocaria a desestabilização da gibbsita e a caulinita seria neoformada (OLIVEIRA ET AL., 2013). Essa transformação se daria pelo desmembramento da couraça bauxítica e formação de um solo aluminoso. Assim, a depender de um caso ou de outro, a bauxita pode ser mais ou menos enriquecida em caulinita. Em se tratando dos fragmentos analisados e da maneira como eles se inserem no perfil laterítico, os resultados de DRX e os estudos de gênese da bauxita na região

(SOARES, 2013) levam a crer que podem estar presentes os dois tipos de caulinita, mas que o segundo (caulinita formada pela degradação da gibbsita) mostra-se mais comum nos fragmentos. Isso porque o mineral parece, por sua identificação nos difratogramas, mal formado e porque logo acima dos fragmentos ocorre uma fácies de material pedogeneizado com enriquecimento em caulinita e cuja gênese infere-se estar associada à degradação da bauxita. Vale acrescentar que os fragmentos de G1 apresentaram melhor detecção da caulinita, acompanhada de menor detecção da gibbsita, o que sugere que estejam mais degradados que aqueles no G2.

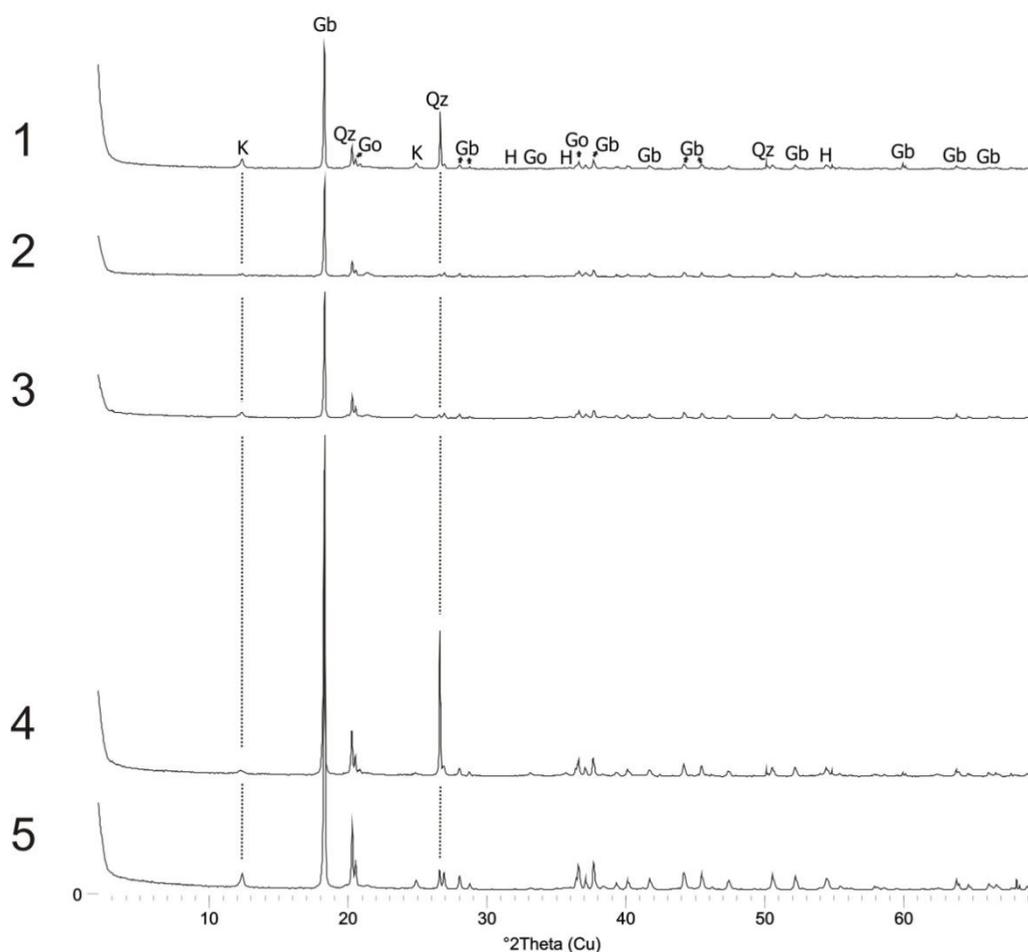


Figura 3 - Difratogramas (radiação de Cu) representativos dos fragmentos de bauxita coletados nos pontos de 1 a 5. K = caulinita; Gb = gibbsita; Qz = quartzo; Go = goethita e H = hematita.

A resposta espectral obtida nos fragmentos de bauxita corrobora com a análise mineralógica. Inicialmente foram observados nas curvas de reflectância pontos de inflexão (picos de absorção) dos principais minerais identificados por DRX, considerando a faixa espectral de 350nm até 2500nm. Os principais pontos estão posicionados em 470nm, 950nm, 1441nm, 1930nm, 2210nm e 2270nm (Figura 4). Em

470nm e 950nm ficam evidenciados os minerais de composição ferruginosa, no caso das bauxitas em estudo, a goethita identificada pela difração. No ponto 1930nm destaca-se a presença de moléculas de água, considerando que a bauxita contém muitos minerais hidróxidos e, por isso, bastante hidratados. Para Rocha e Souza Filho (2013) e Meneses e Madeira Netto (2001), nessa faixa espectral a ocorrência de absorção entre 1400nm e 1900nm é diagnóstica para a presença de água e associação desta com os minerais aluminosos, de tal modo que sua presença indica a sua relação com outros minerais nesse mesmo sistema, estruturando assim a hidroxila. Em 2210nm fica evidenciada a presença de caulinita. Vale acrescentar que, embora a caulinita tenha sido apresentada principalmente nesse ponto de inflexão, em algumas amostras ela ocorreu em 2207nm e 2208nm, indicando que, por causa da sua possível origem pela degradação da gibbsita, ela se apresenta estruturalmente mal formada e susceptível a tais variações. Em 2270nm fica evidenciado o ponto de inflexão da gibbsita, que se caracteriza como o ponto mais bem definido de toda a curva espectral. O único mineral que não foi evidenciado na espectroscopia foi o quartzo. Isso ocorre porque a sua faixa de absorção está no intervalo de 12000nm a 14000nm, já na faixa do Infravermelho Médio, após o intervalo de 2500nm utilizado nessa pesquisa.

Os grupos individualizados mineralogicamente, em decorrência da intensidade de detecção da gibbsita, revelam-se coerentes nas curvas de reflectância. Embora muito semelhantes em termos dos pontos de inflexão observados (geometria da curva), eles se diferenciaram na intensidade com a qual ocorreu essa reflectância. G1 apresentou menor percentual de reflectância que G2, geralmente 1 a 3% menor. Da mesma maneira, considerando o ponto da gibbsita, G2 apresentou picos de inflexão mais bem delineados que G1. Nesses termos, a caracterização espectroscópica revela, juntamente com a caracterização mineralógica, que os fragmentos presentes ao norte da área sugerem maior grau de degradação que aqueles situados ao sul.

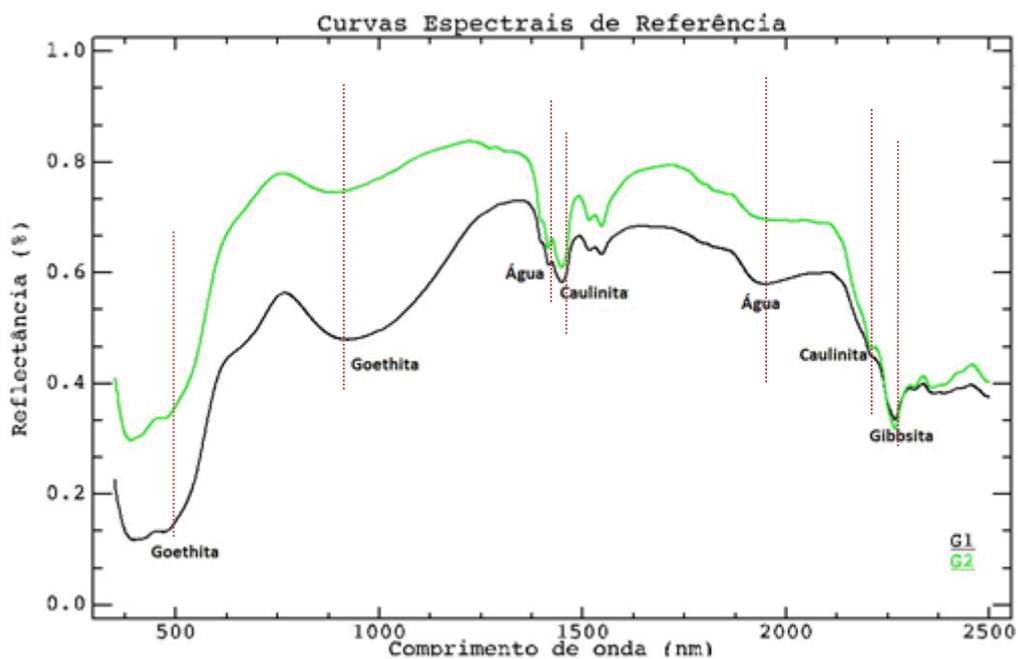


Figura 4 - Curvas espectrais representativas dos dois grupos (G1 e G2) de fragmentos de bauxita.

3.2 Distribuição espacial da bauxita

A identificação das possíveis ocorrências de bauxita, considerando a biblioteca espectral obtida, variou conforme o ângulo analisado, tal como determina o classificador SAM. Dentre os testes realizados, o ângulo 0.20° (radianos) foi aquele que apresentou os melhores resultados, registrando 178 pontos em que o comportamento espectral dos alvos na superfície se aproxima ao da bauxita (Figura 5). Acima de 0.20° foram identificados muitos pontos, causando confusão na classificação. Abaixo desse valor, com o ângulo 0.19° , foram identificadas 18 possíveis ocorrências distribuídas aleatoriamente pela imagem e com pouca associação com as ocorrências já conhecidas. Embora quanto menor o ângulo, maior a acurácia do classificador SAM, a classificação com o ângulo 0.20° foi avaliada como sendo a melhor para realizar a validação em campo, porque a partir dela as possibilidades de ocorrência foram ampliadas, aumentando o número amostral para averiguações. Além disso, foi essa classificação que indicou pontos muito próximos das ocorrências já conhecidas, reiterando a presença da bauxita nestes locais.

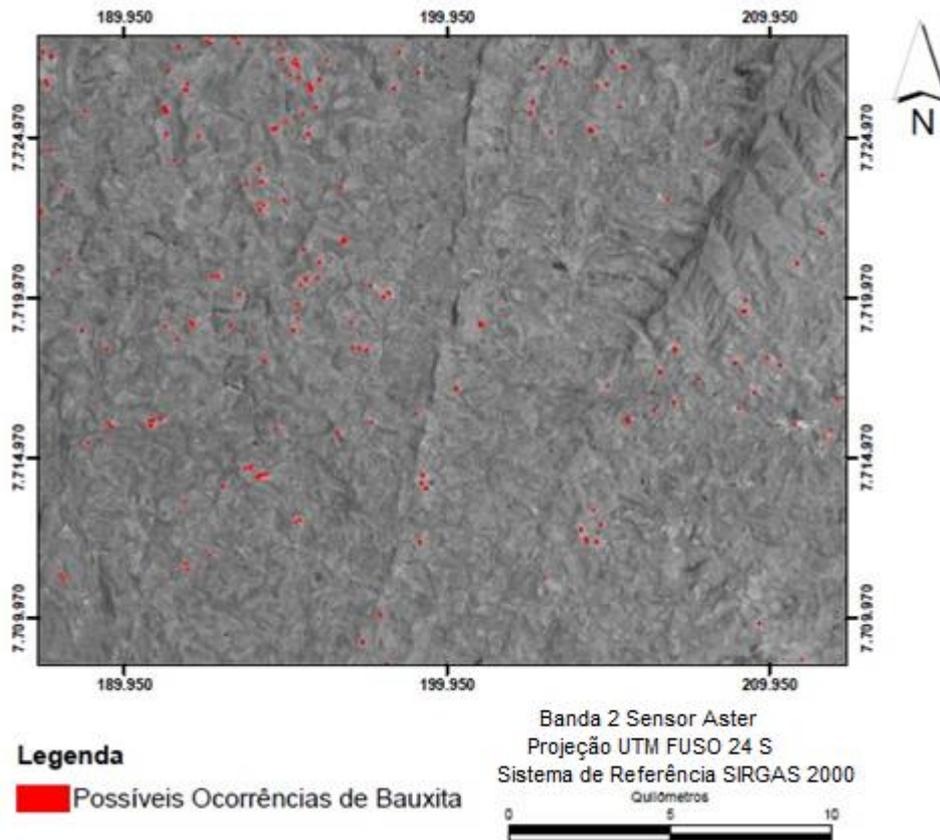


Figura 5 - Possíveis ocorrências de bauxita indicadas na classificação da imagem ASTER pelo classificador SAM com ângulo 0.020.

De posse dos pontos com indicação de ocorrência, e a partir de um roteiro minucioso de campo, foram realizadas visitas em praticamente todas as áreas indicadas pela classificação. Apenas alguns pontos localizados em área de difícil acesso ou em propriedades particulares sem autorização de entrada não foram conferidos. Para todos esses, áreas próximas contendo pontos indicados pela classificação tiveram seus resultados extrapolados. As conferências buscaram observar a presença da bauxita através de cortes de estradas, pela presença de fragmentos na superfície, por escavações feitas pela agricultura (como as covas para o plantio do café) e por meio de tradagens (trado manual). Depois de validados os resultados, construiu-se a matriz de erros e verificou-se a exatidão global da classificação (tabela 1)

Tabela 1 – Matriz de erros da classificação SAM.

	Ocorrência de Bauxita	Não Ocorrência de Bauxita	Total
Ocorrência de Bauxita	88	90	178
Não-Ocorrência	90	88	178
Total	178	178	356

Do total de possíveis ocorrências, 88 foram confirmadas, o equivalente a 49,5%, que confere a classificação um limiar de razoável a bom (MENEZES e ALMEIDA, 2011). As áreas com ocorrência confirmada foram indicadas em amarelo na Figura 6, ao passo que aquelas em que não houve a ocorrência foram identificadas em vermelho.

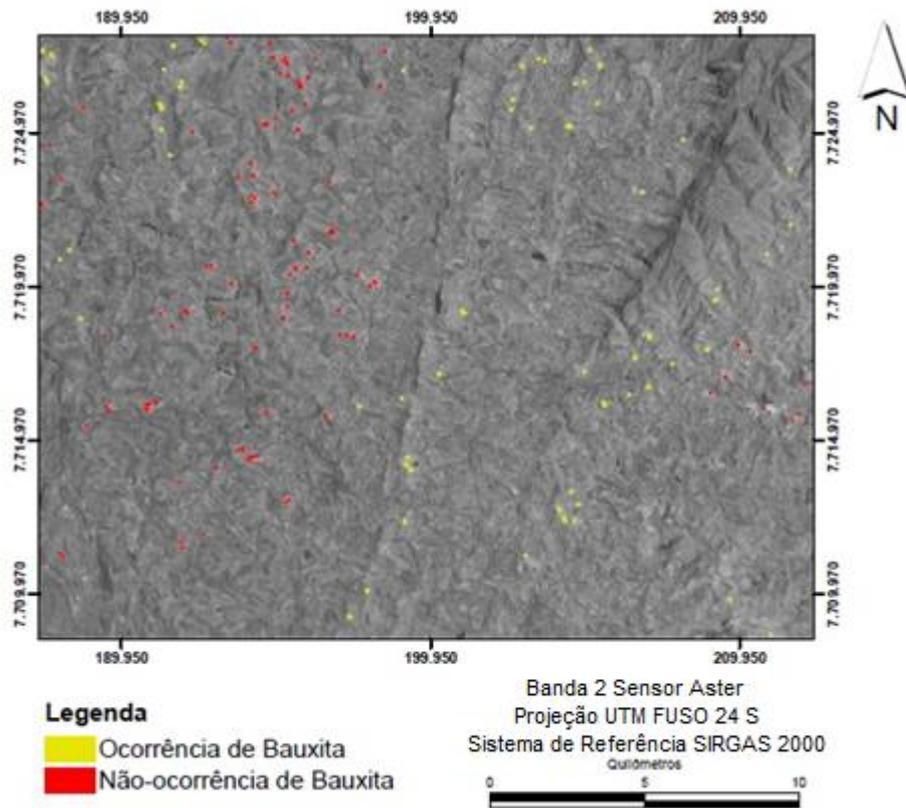


Figura 6 – Validação das possíveis ocorrências em campo com a indicação das ocorrências com bauxita, em amarelo, e das ocorrências sem bauxita, em vermelho.

Nas ocorrências confirmadas, a bauxita é muito semelhante àquela presente nos depósitos já conhecidos e utilizados na obtenção da biblioteca espectral. Elas ocorrem na forma de fragmentos, centimétricos a decimétricos, rosados a esbranquiçados, sotopostos a uma camada friável de solo ou, por vezes, aflorando na superfície (Figuras 7a, 7b e 7c). Esses afloramentos, contudo, parecem indicar que houve a exposição dos fragmentos por interferência antrópica, já que estão associadas a encostas com escavações ou agricultura. Além disso, próximo a esses locais, seja por tráfego ou por cortes de estrada, a bauxita pode ser identificada abaixo da camada de solo. Por tais considerações, é possível supor que em escala regional a bauxita ocorre na forma de um perfil laterítico clássico, com cobertura pedológica sobreposta em maior (~ 2m) ou menor (~ 1m) espessura. Da mesma maneira, conforme observado na imagem e em

campo, essas ocorrências são isoladas e, mesmo que se aglomerem nas porções sudeste, nordeste e noroeste da imagem, não há uma conexão entre elas que permita reconhecer, na atualidade, uma superfície bauxítica contínua.

Nas ocorrências não confirmadas, há uma maior diversidade de materiais. Em muitos casos foi observada a presença de solos pouco profundos, constituídos na base por um saprólito de aspecto micáceo, muito friável (Figuras 7d e 7e). Pontuações esbranquiçadas de caulinita ocorrem intercaladas com paletas de muscovita, indicando serem produtos de sua alteração. Em alguns pontos, a muscovita ocorre com um material quartzo-arenoso, o que explica a identificação de possíveis ocorrências de bauxita em decorrência da associação aluminosa desse mineral. Outras ocorrências não confirmadas revelam a presença de um solo semelhante àquele encontrado sobre os fragmentos de bauxita, principalmente em termos de cor, mas sem conter, subsuperficialmente, tais fragmentos. Nestes casos, observa-se um saprólito rosado, caulínico, com estruturas pseudomorfizadas típicas de bandamento gnaissico. As áreas em que a ocorrência da bauxita não foi verificada se distribuem ao longo de uma faixa sentido norte-sul na porção central da imagem e na extremidade leste da mesma. A gênese de solos a partir de rochas ricas em muscovita pode levar à formação de caulinita e gibbsita, aproximando essas coberturas da paragênese da bauxita.



Figura 7 - Fotos representativas dos materiais nos pontos de conferência, sendo a = fragmentos de bauxita coletados no interior do perfil por tradagem; b = fragmentos de bauxita dispersos na superfície em área de

cultivo de café; c = horizonte de bauxita fragmentada no interior de um perfil exposto por corte de estrada; d = material saprolítico rico em mica e com pontuações esbranquiçadas de caulinita; e = furo de trado em material saprolítico micáceo com fragmentos grandes de quartzo na superfície.

3.3 Contexto geológico-geomorfológico das ocorrências de bauxita

As ocorrências de bauxita validadas em campo não representam grandes aglomerados, mais sim ocorrências pontuais de significativa presença. A superposição desses com alguns mapeamentos temáticos permitiram compreender em que contexto eles se inserem na paisagem (Figura 8).

Em primeiro lugar, considerando o arcabouço litológico regional, a distribuição espacial das ocorrências de bauxita apresentou uma relação quase que exclusiva com as rochas da Suíte Caparaó (Figura 8, Tabela 2). Do total de 88 ocorrências, 89,8% está associado a rochas deste grupo, cujo litótipo predominante é, segundo Novo et al. (2011), um gnaiss ortoderivado, bandado, diorítico a granítico, de granulação média a fina de textura granoblástica com enclaves máficos centimétricos a métricos. O potencial de tais rochas em gerar a bauxita é dado, conforme Soares (2013), por uma paragênese constituída principalmente por feldspato potássico e plagioclásio, além de outros minerais como ortopiroxênio e hornblenda. O quartzo também está presente, porém como mineral residual da rocha a ser encontrado na bauxita, não sendo uma fonte de alumínio.

Além das rochas da Suíte Caparaó, algumas ocorrências podem estar relacionadas à presença do Gnaiss Tonalítico Manhuaçu. Trata-se de um ortognaiss granodiorítico, trondhjemítico a tonalítico, com partes de anfibólio-biotita-gnaiss, geralmente com orientação predominante N-S e de idade Neoproterozoica (HORN ET AL., 2007). Apenas 5 pontos identificados na porção sudeste da área de estudo foram relacionados a essa rocha. Contudo, é provável que um número maior de ocorrências esteja associado a ela, sobretudo aquelas indicadas em azul sob o Paragnaisse do Grupo Andrelândia. Isso porque a maioria das ocorrências não confirmadas de bauxita está relacionada ao Grupo Andrelândia, o que leva a crer que essas rochas não representaram, no contexto em que se insere a pesquisa, importantes protólitos formadores de bauxita. Nesses termos, a relação pontual de ocorrências no contato entre o Gnaiss Manhuaçu e o Paragnaisse Andrelândia pode representar muito mais uma inconsistência da escala do mapeamento disponível que uma relação exata entre a bauxita e sua rocha formadora.

Nos estudos regionais ou de mapeamento, é comum o apontamento de que a gênese de bauxitas na região sudeste de Minas Gerais esteja relacionada tanto a: i) gnaisses e granulitos da Suíte Caparaó quanto aos ii) paragnaisses granatíferos do Grupo Andrelândia (VALENTON ET AL., 1991; ROMANO & CASTAÑEDA, 2006; HORN ET AL., 2007; NOCE ET AL., 2007). Entretanto, quando se consideram os principais trabalhos de gênese em escala local (ROESER ET AL., 1984; LOPES, 1987; LOPES & BRANQUINHO, 1985; VALENTON & MELFI, 1988; BEISSNER, 1989; LOPES & CARVALHO, 1989; BEISSNER ET AL., 1997; SOARES, 2014), a maioria destaca ocorrências associadas às rochas charno-enderbíticas em “i”, inclusive fazendo referência a anfibolitos que foram, posteriormente, reinterpretados como charnokitos milonitizados de cor esverdeada. Assim, não parece conveniente supor que as rochas do Grupo Andrelândia não participem da gênese da bauxita, mas é permissível considerar que o maior potencial encontrado está relacionado às rochas da Suíte Caparaó, ou que pelo menos na região de Espera Feliz tenham sido elas as principais rochas produtoras de bauxita.

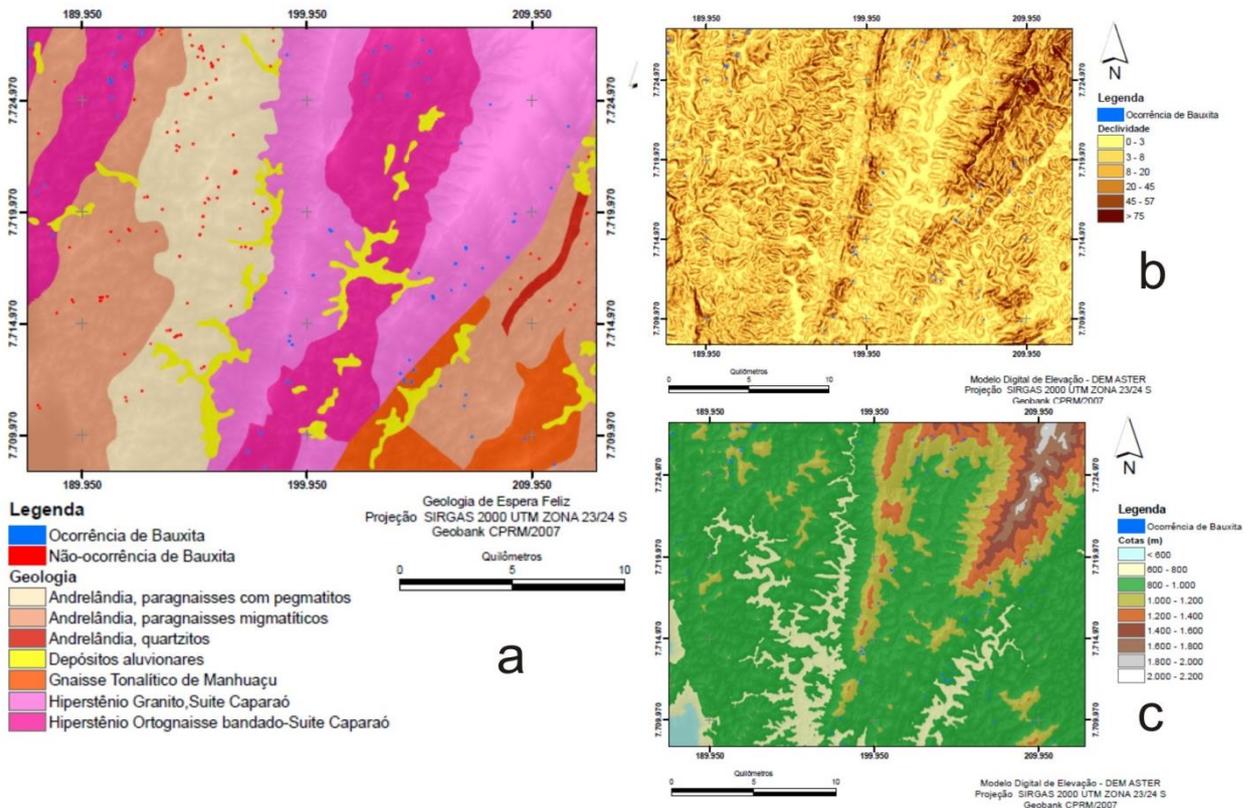


Figura 8 – Superposição das ocorrências de bauxita (em azul) no contexto litológico (a); de declividade (b) e hipsométrico (c).

Tabela 2 – Número de ocorrências em cada classe nos contextos apresentados na Figura 8.

	Categoria	Número ocorrências	% no total
GEOLOGIA	Ortognaisse Suíte Caparaó	42	47,8
	Granito Suíte Caparaó	37	42,0
	Gnaiss Tonalítico Manhauçú	4	4,5
	Paragnaisses Grupo Andrelândia	5	5,7
DECLIVIDADE¹ (%)	0 – 3	6	7,3
	3 – 8	23	18,0
	8 – 20	32	26,4
	20 – 45	22	31,4
	45 – 75	5	15,1
	75 >	0	1,8
ALTITUDE (m)	< 800	0	0
	800 - 1000	54	61,4
	1000 - 1200	27	30,6
	1200 - 1400	6	6,9
	1400 - 1600	1	1,1
	> 1600	0	0

1 – Classes de declividade propostas pela EMBRAPA, 1979

Em se tratando dos aspectos geomorfológicos, as ocorrências de bauxita situam-se principalmente nos terços médio e superior das encostas, com algumas ocorrências também em topos de morros. Ao contrário do que foi observado por Lopes (1987) na região de Miraí, o relevo em Espera Feliz não se restringe a morros e colinas em formato de meia-laranjas, considerando que, por influência das estruturas do maciço do Caparaó, existem muitos espigões e cristas alongadas, ambos orientados de acordo com a foliação principal das rochas. Assim, a bauxita situa-se tanto na porção superior dos mares de morros quanto de alguns espigões. De qualquer maneira, não foi constatado na imagem e no campo a presença da bauxita nos fundos de vale e sopés das encostas. Nesses compartimentos predomina a existência de coberturas argilosas profundas. A declividade corrobora com a posição dos depósitos na vertente, considerando que quase todas as ocorrências estão situadas em relevos ondulados (8-20%) ou forte ondulados (20-45%). Em se tratando da altitude, 61,4% das ocorrências estão localizadas entre 800 e 1000m, 30,6% entre 1200 e 1400m, 6,9% entre 1200 e 1400m e apenas uma ocorrência acima de 1400m.

3.4 Inserção das ocorrências identificadas em Espera Feliz na escala regional

A gênese de depósitos bauxíticos está relacionada à atuação de clima quente e úmido sobre rochas em áreas de relevo plano e bem drenado (TARDY, 1993). Tais rochas devem conter minerais cuja composição química envolve a presença de alumínio, considerando que será esse o elemento acumulado pela atuação do intemperismo intenso. As bauxitas encontradas na região de Espera Feliz se inserem nesse contexto e são, a exemplo das demais bauxitas conhecidas no território brasileiro (MELFI, 1997), produto dos processos de laterização.

As ocorrências identificadas, tratadas aqui como pequenos depósitos, na região de Espera Feliz através da classificação supervisionada encontram-se compartimentados na paisagem, à semelhança das ocorrências já conhecidas desde a década de 70 na região sudeste de Minas Gerais. Além disso, os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a altitude, declividade e posição na vertente em que os depósitos se situam são semelhantes aos demais depósitos. Tais semelhanças confirmam que a região em estudo se insere, em escala regional, no cinturão aluminoso discutido em Valenton et al. (1991). Ainda assim, existem algumas pequenas diferenças nas ocorrências identificadas em Espera Feliz, destacando-se: i) as bauxitas ocorrem também em cotas superiores aos 1.000m, ao passo que na escala regional a maior parte dos depósitos situa-se entre 700 e 900m; ii) as ocorrências são, em termos espaciais, menores e mais isoladas que as ocorrências das regiões de Cataguases, Mirai, Descoberto, Itamarati de Minas, etc; e iii) a bauxitização figura ter sido mais intensa nas rochas da Suíte Caparaó que no Grupo Andrelândia.

De acordo com os estudos para a porção sudeste de Minas Gerais, a bauxita teria se originado a partir de uma superfície aplainada Pré-Terciária esculpida pela erosão, denominada Sul-Americana. A esculturação dessa superfície expôs rochas em escala regional, como os gnaisses do Complexo Juiz de Fora, no qual se inserem tanto a Suíte Caparaó quanto o Grupo Andrelândia. Sob um sistema bem irrigado, com precipitação volumosa, drenagem eficiente e relativa estabilidade tectônica, as rochas teriam sido alteradas para profundos mantos intempéricos, com a bauxitização em porções contínuas da paisagem, criando superfícies bauxitizadas. Posteriormente, essa superfície teria sido compartimentada através da erosão associada a períodos de reativação tectônica. Assim, a disposição dos depósitos no sentido NW-SO seria um produto conjunto da influência estrutural das rochas na sua gênese e do seu reposicionamento pela tectônica distensiva que afetou toda Plataforma Sul-Americana no Cenozóico.

No caso das bauxitas da região de Espera Feliz, sua distribuição concordante ao longo do terço superior das encostas e topos, bem como o caráter seccionado dos depósitos, levam a crer que também ocorreu a compartimentação de uma antiga superfície bauxítica. Contudo, o sensoriamento remoto mostrou que existem depósitos acima da cota de 1.000m. A concordância topográfica dos depósitos sempre foi um grande argumento para advogar a existência de uma paleosuperfície bauxitizada. O fato dos depósitos de Espera Feliz demonstrar uma maior variação de cotas indica que a bauxitização pode ter ocorrido numa superfície que já continha irregularidades topográficas. Isso porque o maciço do Caparaó constitui uma antiforme cuja idade remonta ao Brasiliano, ao passo que a formação da superfície regional seria no final do Mesozóico e início do Cenozóico. A bauxitização, neste caso, é atribuída por diversos autores como sendo um evento de maior expressão no Eoceno e, posteriormente, no Mioceno.

Os depósitos que hoje permanecem na paisagem de Espera Feliz seriam residuais, estando isolados pelo entalhe da drenagem, ou ainda degradados por processos de pedogênese. No primeiro caso, como dito, identifica-se o importante papel atribuído à reativação tectônica pós-Mesozóica, conforme destacado por Romano e Castañeda (2006). Soares (2013) enfatiza que a região de Espera Feliz apresenta nítidos indicadores da influência da neotectônica. Mesmo que alguns canais sigam a orientação preferencial da foliação (NNE), vários estão orientados conforme o padrão das fraturas (NW) responsáveis pelos principais lineamentos. Muitos canais formam corredeiras resultantes de deslocamentos verticais de blocos e muitas feições de meandros soerguidos são observadas nas vertentes. É provável que essa reativação tenha ocorrido durante o transcorrer do Cenozóico, quando todo o sudeste do Brasil foi tectonicamente reativado por pulsos (SAADI, 2005). Pesquisas em outros depósitos brasileiros destacam o importante papel que as reativações tectônicas no Oligoceno e Plioceno, sob clima seco, tiveram para a remobilização erosiva de depósitos. Zalán e Oliveira (2005) destacam que a máxima expressão da tectônica distensiva no sudeste brasileiro ocorreu entre 58-20 Ma, quando os horsts, formados paralelamente à linha da costa, foram erodidos, alimentando assim as bacias de Santos, Campos e do Espírito Santo.

A degradação geoquímica da bauxita é um importante mecanismo a considerar quando da necessidade de compreender porque os depósitos encontram-se em pontos isolados em Espera Feliz. Neste caso, nenhuma ocorrência foi verificada sem que houvesse a associação com uma cobertura pedológica. Essa cobertura tem sido apontada

como resultado da degradação superficial da bauxita a partir de um processo conhecido como ressilicificação, induzido pela colonização vegetal em momentos de alternância para climas mais úmidos (VAN DER MAREL, 1960 apud VALENTON, 1974; TEWARI, 1963; ALEVA, 1965; VALENTON, 1974; BOCQUIER ET AL., 1982; BOULANGÉ & BOCQUIER, 1983; BOULANGÉ, 1983; SÍGOLO & BOULANGÉ, 1987; VARAJÃO ET AL., 2001; OLIVEIRA ET AL., 2013). Muitos depósitos isolados na paisagem podem ter sido totalmente, ou quase totalmente, degradados pela pedogênese, transformando-se em solos. Essa degradação influenciou, inclusive, na resposta espectral dos alvos (G1 e G2 apresentados no item 3.1), considerando que algumas bauxitas encontram-se mineralogicamente mais ou menos transformadas.

4. Conclusões

A bauxita na região de Espera Feliz é predominantemente gibbsítica com conteúdo variável de caulinita e quartzo. No caso da caulinita, esse conteúdo variável reflete os diferentes graus de degradação dos depósitos bauxíticos. O comportamento espectral da bauxita traduz com clareza sua mineralogia, sendo possível reconhecer, também pelas curvas espectrais, os diferentes graus de degradação nos quais os depósitos se encontram. Essa degradação é geoquímica e está associada à mudança das condições físico-químicas do ambiente, com importante papel da vegetação. Com base nela, foram reconhecidos dois pequenos grupos (G1 e G2), considerando as ocorrências utilizadas como amostras para a caracterização mineralógica e espectral.

O sensoriamento remoto confirmou ser uma ferramenta de grande utilidade para a prospecção de ocorrências minerais, sobretudo quando essas apresentam aspectos que tornam complexo seu descobrimento por atividades estritamente de campo. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que as ocorrências de bauxita na região de Espera Feliz têm sua identificação dificultada pela maneira compartimentada como ocorrem na paisagem e pelo fato de estarem quase sempre encobertas por uma camada de solo.

Geologicamente, a espacialização da bauxita apresenta-se correlacionada principalmente às rochas da Suíte Caparaó, o que revela um grande potencial dessas rochas em se transformarem em bauxita. A não confirmação da presença de bauxitas sobre os Paragnaisses do Grupo Andrelândia não significa que tais rochas não sejam fonte geradoras de minério de alumínio. Os resultados até então obtidos por esse estudo

permitem considerar apenas que, possivelmente, na região de Espera Feliz, elas não tenham sido bauxitizadas como os granulitos da Suíte Caparaó.

Geomorfologicamente, a maneira como as ocorrências estão localizadas na paisagem faz com que a bauxita na região de Espera Feliz integre o cinturão aluminoso do sudeste de Minas Gerais e confirma o modelo proposto por Lopes (1987). Em Espera Feliz, contudo, a presença de alguns depósitos em cotas altimétricas superiores pode ser um indicativo de que já no momento da formação da bauxita haviam irregularidades topográficas mais pronunciadas, tal como o maciço do Caparaó, que hoje constitui um conjunto de serras residuais alinhadas circundadas por um relevo do tipo mares de morro.

A criação de uma biblioteca espectral com curvas de referência para tipos diferentes de bauxita se mostra como promissora na identificação de áreas que contém esses materiais, de tal modo que, aliada a outras técnicas de validação, torna-se uma ferramenta importante e valiosa no mapeamento de novas ocorrências.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem ao Laboratório de Espectroscopia de Reflectância da Universidade Estadual de Campinas (LER/UNICAMP) pelo auxílio na aquisição das curvas espectrais e na concessão da Imagem ASTER, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento da pesquisa, ao Conselho de Aperfeiçoamento e Pesquisa do Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Pós Graduação ao Autor 1 dessa pesquisa e, ao Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais.