



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DAIVESON SERRÃO ABREU

**O perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo,
sudeste do Pará: mineralogia, composição química,
minerais pesados e anatásio**

GEOCIÊNCIAS
U F P A

BELÉM-PARÁ

2016

DAIVESON SERRÃO ABREU

**O perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo,
sudeste do Pará: mineralogia, composição química,
minerais pesados e anatásio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geologia da Universidade Federal
do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: prof. Dr. Marcondes Lima da Costa.

BELÉM-PARÁ

2016

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Abreu, Daiveson Serrão, 1990-

O perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo, sudeste do
Pará: mineralogia, composição química, minerais pesados e
anatásio / Daiveson Serrão Abreu. – 2016.

63 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcondes Lima da Costa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências,
Faculdade de Geologia, Belém, 2015.

1. Hematita – Pará. 2. Goethita - Pará. 3. Caulinita -
Pará. I. Título.

CDD 22. ed.: 549.523098115

DAIVESON SERRÃO ABREU

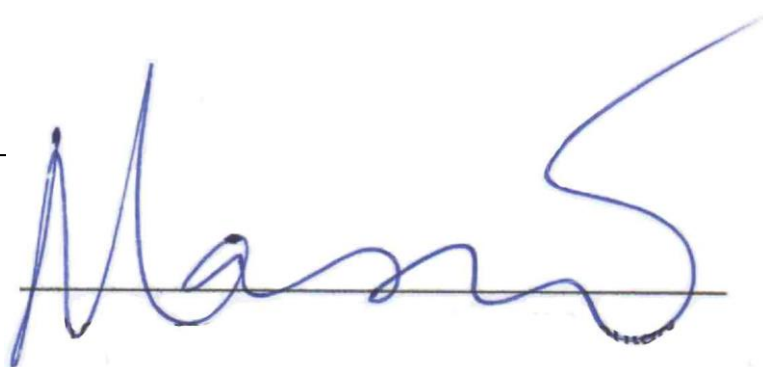
**O perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo,
sudeste do Pará: mineralogia, composição química,
minerais pesados e anatásio**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geologia da Universidade Federal
do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Data de Aprovação: ___ / ___ / ___

Conceito: _____

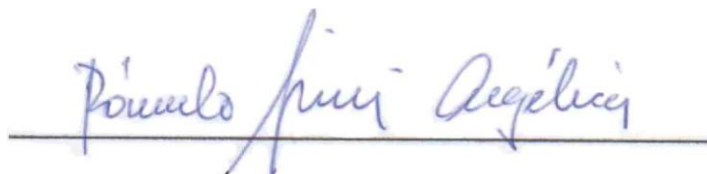
Banca Examinadora:



Prof. Marcondes Lima da Costa – Orientador

Pós-Dr. em Mineralogia e Geoquímica

Universidade Federal do Pará



Prof. Rômulo Simões Angélica – Membro

Pós-Dr. em Mineralogia e Geoquímica

Universidade Federal do Pará



Geol. Clovis Wagner Maurity – Membro

MSc. em Mineralogia e Geoquímica

Instituto Tecnológico Vale

Dedico à minha amada família:

Maria Elizia Serrão, minha querida mãe

Josiel Abreu, meu pai

Anderson Junior Serrão Abreu, meu irmão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e força para superar todos os desafios do curso de Geologia;

Ao professor Dr. Marcondes Lima da Costa pelas correções, orientação e paciência, assim como pela oportunidade de desenvolver diferentes trabalhos de iniciação científica;

À empresa Votorantim Metais que possibilitou o suporte de campo para coleta de amostras para realização desse trabalho;

Ao CNPq pelas bolsas de estudo concedidas através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Agradeço a Oficina de Preparação de Amostras (OPA), Laboratório de sedimentologia, Laboratório de Separação Mineral, Laboratório de Análises Químicas, Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LaMiGA), Laboratório de Laminação (LAM) e Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) pelo suporte técnico durante a preparação de amostras ou realização de análises;

Aos técnicos de laboratório do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), especialmente Natalino Valente, João Lopez, Ana Paula e Joelma Lobo pela atenção e disponibilidade;

Ao Professor Cláudio Lamarão e geóloga Gisele Marques pela concessão de inúmeras análises de microscopia eletrônica de varredura que enriqueceram este trabalho;

Aos amigos do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA) da UFPA, especialmente a Suyanne Flavia Rodrigues, Maria do Socorro Vilhena, Darilena Porfirio, Heliana Pantoja, Pablo Santos, Laís Aguiar, Leonardo Boiadeiro, Patricia Pinheiro, Fernanda Sobrinho, Alessandro Leite, Glayce Jolhy, Roseane Norat, Priscila Gozzi, Luiz Claudio, Aline Silva, Igor Barreto e Vânia Reis;

À todos os companheiros e amigos de graduação do curso de geologia da UFPA, incluindo os já formados Thiago Carvalho, Helder Oliveira, Rafael Guimarães, Bruna Nogueira, Ingrid Roberta, Ailton Brito, Reinaldo Fontoura, Edson Batista, Franco Felipe, Dayane Coelho, Rômulo Amaral, Arthur Aragão e Quézia Alencar, e também aos formandos que estão no mesmo “barco”, em especial Meireanny Gonçalves, Raiza Santos, Jully Afonso, Tayna Cunha, Adson Pinheiro, Alexandre Castelo, Junior Moura, Roberto Filho, Eliã Silva, Paulo Machado, Letícia Arantes, Camila Fonseca, Ramon Carvalho, Lucas Baia, Christian Santana, Dante Alex, Patricia Rodrigues, Vanessa Pinheiro, Leandro Melo, Victor Gonçalves, Sâmia Vianna, Maciel Martins, Fernando Andrade e Lidiane Medeiros;

À minha namorada Nyanne Monteiro, pelo constante carinho, apoio e compreensão ao longo desses anos de graduação;

Por fim agradeço a minha mãe, pai, irmão e família pelo apoio incondicional e confiança que me permitiram finalizar esta etapa acadêmica.

“É preciso força para sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê.”

Marcelo Camelo.

RESUMO

O perfil laterítico imaturo de Abel-Figueiredo se situa na região de Paragominas – Rondon do Pará no sul do Estado do Pará, que se destaca pela ocorrência de formações lateríticas, com grandes depósitos de bauxitas e caulim associados, ligados a perfis lateríticos maduros. As formações lateríticas imaturas também se destacam nessa região, com a exposição de excelentes perfis imaturos durante a construção da BR-222. No km 137 desta rodovia, a 9 km a nordeste da cidade de Abel Figueiredo localiza-se o perfil laterítico objeto do estudo. Deste, foram coletadas 10 amostras, as quais foram descritas, imageadas, preparadas e submetidas a análises mineralógicas por DRX, microscopia óptica, eletrônica e análises químicas com o objetivo de desenvolver um estudo textural, mineralógico e químico em detalhe do perfil laterítico imaturo e sua cobertura, além de caracterizar o conteúdo de minerais pesados e anatásio para permitir exercer discussões sobre a rocha fonte e processos evolutivos desse perfil. Este consiste de uma sequência de três horizontes: a crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada na base de coloração marrom avermelhada escura, microporosa, cavernosa e apresenta nódulos ferruginosos de óxi-hidróxidos de ferro; o horizonte esferolítico a nodular sobreposto é representado por esferólitos de coloração marrom avermelhado escuro, envolvidos por matriz argilosa; a cobertura argilosa no topo é representada por um material silto-argiloso amarelo, homogêneo tido como latossolo. A mineralogia do perfil imaturo e cobertura é representada por hematita, goethita, caulinita, quartzo e como acessórios anatásio e minerais pesados (zircão, rutilo, turmalina, cianita, estauroлита e opacos). No entanto estes divergem em conteúdo, que oscilam segundo litologia e mesmo os horizontes. A composição química reforça os dados mineralógicos, confirmando o domínio de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 . Portanto, a composição mineralógica e a distribuição dos teores dos componentes químicos principais e assembléia de minerais pesados (mostram domínio de minerais ultraestáveis) são compatíveis com a evolução laterítica, equivalente aos perfis lateríticos mais bem distribuídos na Amazônia, conhecidos como imaturos.

Palavras-chave: Hematita. Goethita. Caulinita.

ABSTRACT

The immature lateritic profile Abel Figueiredo is located in the region Paragominas - Rondon do Pará in southern Pará State, that stands out by occurrence of lateritic formations, With large deposits of bauxite and kaolin associates, linked to mature lateritic profiles. Immature lateritic formations also stand out in this region, with the exhibition of excellent immature profiles during the construction of the BR-222. At km 137 of this highway, 9 km northeast of the city of Abel Figueiredo is located lateritic profile object of study. From it, 10 samples were collected, which were described, photographed, prepared and submitted to mineralogical analysis by XRD, optical and eletronic microscopy; and chemical analysis aiming to develop a textual study, mineralogical and chemical in detail the immature lateritic profile and coverage, and to characterize the content of heavy minerals and anatase to allow exercise discussions on the source rock and evolution processes that profile. This consists of a sequence of three horizons: the iron-aluminous crust partially dismantled at the base, the crust is dark reddish brown, microporous, cavernous and shows ferruginous nodules of iron oxy-hydroxides; the horizon spherolithic the nodular superimposed is represented by spheroliths dark reddish brown surrounded by clay matrix; the clay cover at the top is represented by a yellow silty-clay material, homogeneous considered latosol. The mineralogy of the immature profile and coverage is represented by hematite, goethite, kaolinite, quartz, accessory minerals include anatase and heavy minerals (zircon, rutile, tourmaline, kyanite, staurolite and opaque). However, these differ in content, ranging second lithology and even horizons. The chemical composition reinforces mineralogical data, confirming the domain SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 and TiO_2 . Therefore, the mineralogical composition and the distribution of the main chemical components and assembly of heavy minerals (show domain minerals ultra stable) are compatible with the lateritic evolution, equivalent to lateritic profiles better distributed in the Amazon, known as immature.

Keywords: Hematite. Goethite. Kaolinite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de acesso e de localização do perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo, no sudeste do Pará. Elaborado pelo autor utilizando shapefiles no Software ArcGIS 10.....	17
Figura 2- Curva de calibração indicando uma proporcionalidade entre absorvância e concentração de TiO ₂ na solução diluída	20
Figura 3 – Geologia da região nordeste-sudeste do Pará. Vide área de estudo do presente trabalho.....	24
Figura 4 – Seção esquemática do perfil laterítico do km 137 da BR-222 mostrando os horizontes identificados: crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada (A), horizonte esferolítico a nodular granodecrescente (B) e cobertura de argila amarela (solo) (C)	27
Figura 5 – Perfil laterítico do km 137 da BR-222 com os horizontes identificados.....	28
Figura 6 – Crosta ferroaluminosa. A) Contato gradacional entre crosta ferroaluminosa desmantelada e horizonte esferolítico; B) Estrutura colunar com canais preenchidos por material argiloso; C) Fragmentos da crosta colunar; D) Nódulos de hematita	29
Figura 7 – Difractogramas de raios X de amostras da crosta ferroaluminosa. A) nódulos ferruginosos da crosta ferruginosa; B) matriz argilosa da crosta ferruginosa desmantelada. Caulinita (Kln); goethita (Gt); hematita (Hem); quartzo (Qtz)	30
Figura 8 – Fotomicrografias da crosta ferroaluminosa. A) e B) nódulos da crosta ferruginosa; C) Exibe poros preenchidos parcialmente por grãos de quartzo e mostrando o plasma ferruginoso microcristalina; D) Vênulas de goethita de textura coloidal.....	30
Figura 9 – Imagens de MEV da crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada. A) e B) Plasma formado pelos oxi-hidróxidos de ferro com nódulos intraplasma. C) Detalhe mostrando agregados de hematita e goethita. D) e E) Detalhe mostrando agregados esféricos de hematita e goethita preenchendo poros. F) cristal de goethita placóide de contornos arredondados.....	31
Figura 10 – Esferólitos grandes e pequenos do horizonte esferolítico exibindo internamente coloração marrom avermelhada escuro e externamente são envolvidos por uma matriz argilosa amarelada. Enquanto o núcleo é de material criptocristalino (plasma) vermelho típico a borda tende a marrom escura, e ambos envolvem grãos angulosos, quebradiços de quartzo	32
Figura 11 – Fotomicrografias de porções do interior dos esferólitos do horizonte esferolítico. A) e B) plasma ferruginoso cimentando grãos quartzo com morfologia e tamanhos variados sob o microscópio ótico e nicóis x. C) e D) Esse mesmo plasma observado sob MEV mostrando os cristais tabulares e discóides de hematita, e em parte goethita. Eles guardam a mesma morfologia observada na crosta ferruginosa da figura 10	33

Figura 12 – Difractogramas de raios x de amostras do horizonte esferolítico. A) De esferólitos individuais; B) Da matriz argilosa amarelada. Caulinita (Kln); hematita (Hem)	33
Figura 13 – Exemplo de amostra da cobertura argilosa exibindo o aspecto grumoso e os esferólitos ferruginosos.....	34
Figura 14 – Difractograma de raios X de amostras da cobertura argilosa. A) Cobertura de argila (mineralogia geral); B) Grumos; C) Esferólitos. Caulinita (Kln); goethita (Gt); hematita (Hem), quartzo (Qtz), anatásio (Ant)	35
Figura 15 – Imagem de MEV com espectros de EDS de material da cobertura argilosa (solo) mostrando o domínio de caulinita em cristais submicrométricos	36
Figura 16 – Distribuição das concentrações dos elementos maiores ao longo do perfil laterítico imaturo da BR-222, km 137. SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ e TiO ₂ e P.F.....	40
Figura 17 – Padrão de distribuição dos elementos traços confrontadas com a média crustal de Taylor & McLennan 1985. Legenda: Cobertura argilosa topo (CART), Cobertura argilosa base (CARB), Horizonte esferolítico (HES), Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada (CFCPD), Crosta ferroaluminosa Nodular parcialmente desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Base (CFNPDB)	41
Figura 18 – Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa da BR-222, km 137.....	42
Figura 19 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa na BR-222, km 137.....	43
Figura 20 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa na BR-222, km 137.....	44
Figura 21 – Padrão de distribuição dos ETR normalizados aos condritos. Legenda: Cobertura argilosa topo (CART), Cobertura argilosa base (CARB), Horizonte esferolítico (HES), Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada (CFCPD), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Base (CFNPDB)	45
Figura 22 - Difractogramas de raios x mostrando a composição mineralógica dos resíduos extraídos quimicamente das amostras do perfil imaturo. Figura 22A – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada inferior (zona crosta); 22B – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada inferior (zona matriz); 22C – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada superior (zona crosta); 22D – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada superior (zona matriz); 22E - Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada colunar (zona colunar) 22F – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada colunar (zona matriz); 22G – Horizonte esferolítico (zona esferólitos); 22H – Horizonte esferolítico (zona matriz); 22I – Cobertura argilosa	47

Figura 23 – Imagens de MEV mostrando aglomerados de cristalitos de anatásio presentes no perfil laterítico imaturo da BR-222, km 137 (Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada)	49
Figura 24 – Imagens de MEV mostrando aglomerados cristalitos de anatásio presentes no perfil laterítico imaturo do km 137 (Horizonte esferolítico e cobertura argilosa)	50
Figura 25 – Fotomicrografias de minerais pesados em luz natural identificados no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa da BR-222, km 137. Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Base (CFNPDB), Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta Ferroaluminosa Colunar Parcialmente Desmantelada (CFCPD), Horizonte Esferolítico a nodular (HES) e cobertura argilosa (CAR)	51
Figura 26 – Distribuição composicional comparativa dos minerais pesados do perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa. Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Base (CFNPDB), Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta Ferroaluminosa Colunar Parcialmente Desmantelada (CFCPD), Horizonte Esferolítico a Nodular (HES) e Cobertura Argilosa (CAR)	52
Figura 27 – Classificação das texturas superficiais mais frequentes encontradas nos grãos de zircão sob imagens de MEV. 1- bordas de erosão; 2- fraturas conchoidais; 3- fraturas paralelas; 4 – superfície fresca; 6-placas soerguidas/deslocadas; 7- cavidades circulares	53
Figura 28- Imagens de MEV das principais formas dos tipos de zircões presentes no perfil laterítico imaturo e cobertura de argila de acordo com Pupin, 1980	55
Figura 29 - Imagens de MEV com espectros de EDS mostrando formas e texturas superficiais de rutilo e turmalina no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa: no rutilo em (a), (c), (e) e (g) formas prismáticas subédricas, e as texturas superficiais de abrasão e microfraturas; na turmalina em (b), (d) e (h) e marcas de ranhura e em (f) fratura conchoidal	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química expressão em % em peso (elementos maiores) e ppm (elementos traços) confrontadas com a média crustal (MC) com base em Taylon & McLennan 1985. Legenda: Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada base: CFNPDB; Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada topo: CFNPDT; Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada: CFCPD; Horizonte esferolítico a nodular: HES; Cobertura argilosa: CAR..38

Tabela 2 - Composição química expressão em ppm (elementos terras raras) confrontadas com a média crustal (MC) com base em Taylon & McLennan 1985. Legenda: Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada base: CFNPDB; Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada topo: CFDT; Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada: CFCPD; Horizonte esferolítico a nodular: HES; Cobertura argilosa: CAR.....39

Tabela 3 – Composição química elementar em porcentagem para cristais de anatásio. CFPD – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada; HES – Horizonte Esferolítico a nodular; CAR – Cobertura de argila; ZNI – Zona nodular inferior; ZNS – Zona superior; ZC – Zona colunar.48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 APRESENTAÇÃO	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVO	16
1.4 LOCALIZAÇÃO	16
2. MATERIAIS E MÉTODOS	18
2.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	18
2.2 MICROSCOPIA ÓTICA	18
2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	18
2.4 EXTRAÇÃO DE ANATÁSIO	19
2.5 EXTRAÇÃO DE MINERAIS PESADOS	20
2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE COM ENERGIA DISPERSIVA (MEV- EDS)	21
2.7 ANÁLISES QUÍMICAS	22
3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	23
3.1 LITOESTRATIGRAFIA	23
3.1.1 Grupo Itapecuru	25
3.1.2 Formação Ipixuna	25
3.1.3 Formações Lateríticas Maturas	25
3.1.4 Formações lateríticas imaturas na região do Abel figueiredo-Rondon do Pará	26
4. RESULTADOS	27
4.1 ESTRUTURAÇÃO DO PERFIL LATERÍTICO IMATURO E SUA COBERTURA ARGILOSA EM ABEL FIGUEIREDO-RONDON DO PARÁ	27
4.1.1 Morfologia e mineralogia dos horizontes	28
4.1.1.1 Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada	28
4.1.1.2 Horizonte Esferolítico a Nodular Granodecrescente	31
4.1.1.3 Cobertura de Argila Amarela (solo)	34
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	36
4.3 ANATÁSIO	46
4.4 MINERAIS PESADOS	50
4.4.1 Zircão	52
4.4.2 Rutilo	56
4.4.3 Turmalina	56
4.4.4 Outros Minerais Pesados	58
5. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

A existência dos lateritos foi primeiramente reconhecida por Buchanan em 1807, material até então não registrado pelo mundo geológico. Buchanan (1807) os descreveu como 'sedimentos ferruginosos' e observou que estes eram cortados na forma de tijolo e exposto ao sol para endurecer e então empregá-lo na construção de casas na Planície Costeira de Malabar, Índia.

No entanto, a comunidade científica começou a reconhecer a importância dos lateritos apenas nas últimas décadas, impulsionada pela descoberta que perfis lateríticos podem ser portadores de importantes mineralizações. Desde a década de 70, o interesse por perfis lateríticos e solos lateríticos aumentou com pesquisas que foram conduzidas na Austrália, África Central e Equatorial, Índia, Centro-Sul do Brasil, Região Amazônica, e Sudeste da Ásia (COSTA, 1997).

Especificamente na região amazônica, as primeiras ocorrências de lateritos foram feitas em 1903 por Katzer (apud COSTA, 1991) que os descreveu como arenitos ferruginosos. Costa (1991) classificou os lateritos da Amazônia como maduros e imaturos com base em suas feições geológicas, mineralógicas e geoquímicas, cujas variações refletem o grau de evolução.

Perfis lateríticos imaturos, abordados neste trabalho, tem ampla distribuição na Amazônia e fazem parte das *formações lateríticas* (COSTA, 2007). Esses perfis em termos gerais estão estruturados em *horizontes típicos* (crosta, horizonte mosqueado/argiloso e saprólito) que se sobrepõem a rocha mãe ou a um substrato de rochas sãs. Predominam os oxi-hidróxidos de Fe (goethita e hematita), caulinita e quartzo o que, quimicamente, representa o domínio de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 e H_2O (COSTA 1991). Ao contrário dos perfis maduros, eles são menos propícios a enriquecimentos minerais, porém podem formar os depósitos de Au, Pt, Ni, Mn e de resistatos (COSTA, 2007).

1.2. JUSTIFICATIVA

Perfis lateríticos imaturos foram identificados em vários países da América do Sul, com destaque para o Brasil, Guianas, Colômbia e Venezuela, e em várias regiões da África, Austrália, e muitas ilhas e arquipélagos dos oceanos Índico e

Pacífico (COSTA, 2007). Representam assim os perfis lateríticos mais frequentes encontrados na face da Terra (COSTA, 2007). São considerados valiosos materiais geológicos que podem ser portadores de importantes mineralizações e depósitos minerais no mundo inteiro. Vários desses depósitos são explorados no território brasileiro, principalmente na região amazônica onde é palco de intensa lateritização. No domínio dos depósitos de bauxitas de Rondon do Pará e Paragominas essas formações são frequentes e muitas vezes dominam a paisagem, sejam como depósitos autóctones sejam alóctones. Um desses perfis autóctones foi selecionado para o desenvolvimento de estudo mineralógico e textural de detalhe, considerando o perfil em si e ainda os seus produtos de alteração intempérica mais recentes. Além disso se concentrou na caracterização do seu conteúdo de zircão e anatásio, que em conjunto os estudos gerais, permitissem exercer discussões sobre a rocha fonte e processos evolutivos desse perfil.

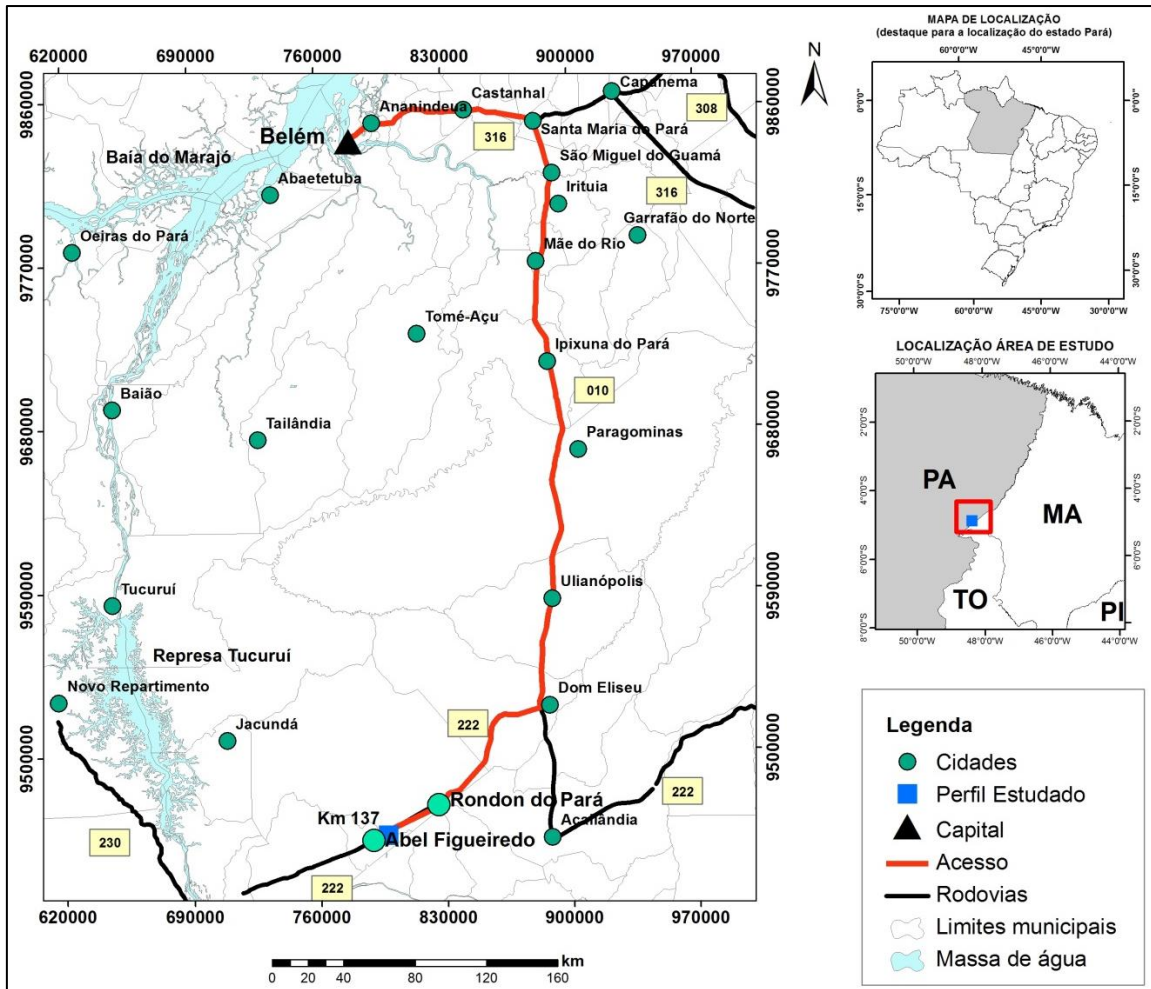
1.3. OBJETIVOS

Estudar em detalhe um perfil laterítico imaturo e sua cobertura argilosa da BR-222, km 137 da região de Abel Figueiredo-Rondon do Pará, enfatizando características texturais, mineralógicas e químicas de seus horizontes e a abundância e morfologia dos minerais acessórios anatásio e zircão.

1.4. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se entre as cidades de Abel Figueiredo e Rondon do Pará, na região sudeste do Pará, distantes cerca de 500 km de Belém, às margens da rodovia federal BR-222. O acesso, a partir de Belém-PA, é feito pela BR-316 até Santa Maria do Pará (PA), continuando o trajeto pela BR-010 até o município de Dom Eliseu (PA). Por fim, toma-se a BR-222 percorrendo cerca de 116 km até o grande afloramento de perfil laterítico do km 137 (0797060/ 9456338, zona 22M), aberto por necessidade de material de empréstimo para construção dessa rodovia (figura 1).

Figura 1 – Mapa de acesso e de localização do perfil laterítico imaturo de Abel Figueiredo, no sudeste do Pará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo consiste em 10 amostras selecionadas de um perfil laterítico imaturo localizado às margens da rodovia BR-222, situado a 9 km a nordeste da cidade de Abel Figueiredo (BR-222, km 137), coletadas pelo orientador prof. Dr. Marcondes Lima da Costa e posteriormente complementadas pelo autor e seu orientador.

2.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras selecionadas foram descritas mesoscopicamente com auxílio de lupa de bolso (aumento de 14x) e imageadas. Uma alíquota *in natura* foi empregada para elaboração de lâmina delgada polida, outra foi homogeneizada, cominuída e quarteada para extração física de minerais pesados e mais outra pulverizada em graal de ágata para identificação mineralógica por DRX, extração química de anatásio e análises químicas totais.

2.2. MICROSCOPIA ÓTICA

10 lâminas delgadas polidas de amostras representativas de cada horizonte foram investigadas por microscopia ótica, quando foram enfatizados os padrões texturais e suas relações com os minerais e formas plásmicas e feições herdadas. Também foram confeccionadas 10 lâminas de minerais pesados para identificação dos minerais transparentes e contagem de no mínimo 150 grãos/lâmina. As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação (LAM) do PPGG-IG-UFGA e os estudos por microscopia ótica de luz transmitida no Laboratório de Mineralogia e Gemologia do IG-UFGA com auxílio do microscópio Zeiss, modelo AXIOLAB POL. Os principais materiais de apoio para as descrições dos aspectos texturais e identificação dos minerais pesados foram o *Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering* de Delvigne (1999) e *Heavy Minerals in Color* de Mange e Maurer (1992), respectivamente.

2.3. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Os principais minerais do perfil laterítico foram identificados por difração de Raios X (DRX) método pó no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LaMiGA) do IG-UFGA, que auxiliaram as análises por microscopia ótica. As análises

foram realizadas com auxílio de difratômetro Bruker, modelo 2D PHASER, equipado com anodo de cobre ($\lambda_{\text{Cu K}\alpha} = 1.54184 \text{ \AA}$) em condições de funcionamento de 30 kV de tensão e 10 mA de corrente, passo de 0,02 e tempo de passo de 0,2s com detector do tipo Lynxeye. A aquisição dos dados foi realizado através do software X'Pert High Score Plus do Laboratório de Caracterização Mineral do PPGG_IG-UFGA e o tratamento realizado com o programa CoreIDRAW modelo X6.

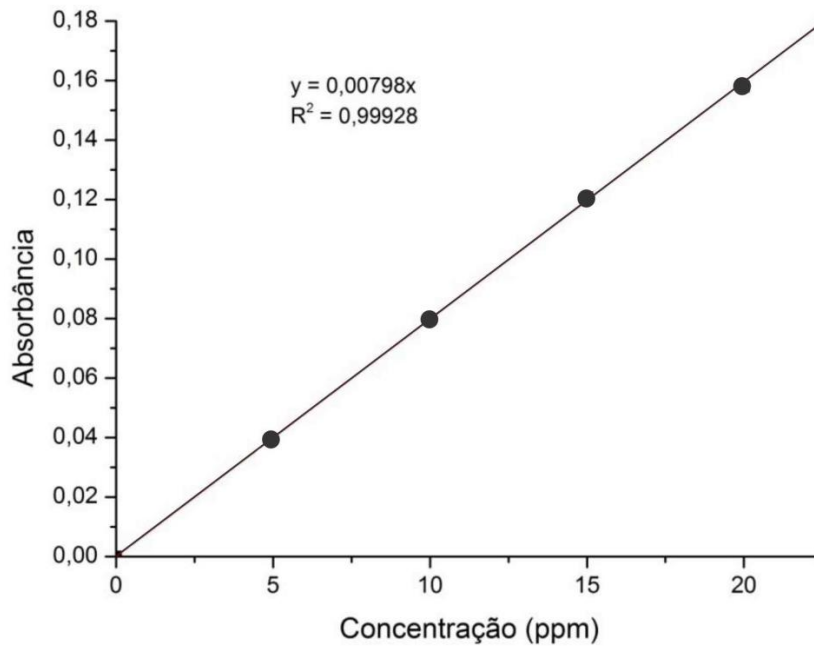
2.4. EXTRAÇÃO DE ANATÁSIO

O anatásio foi extraído de 10 amostras do perfil laterítico pelo método proposto por Sayin e Jackson (1975). A metodologia consiste em tratar as amostras com o ácido hexafluortitânico (H_2TiF_6) que dissolve quimicamente a caulinita e a maioria dos outros filossilicatos de solos e sedimentos, e concentra o anatásio e minerais como zircão e rutilo no resíduo.

Em primeiro lugar foi necessário produzir o ácido H_2TiF_6 . Para esse fim foi utilizado 400 ml de HF 48% MERCK e 180 g de reagente TiO_2 de alta pureza MERCK. HF e TiO_2 reagem produzindo H_2TiF_6 .aq e mais duas moléculas de H_2O , conforme a seguinte reação exotérmica: $6\text{HF.aq} + \text{TiO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{TiF}_6$.aq + $2\text{H}_2\text{O}$ (SAYIN; JACKSON, 1975). Para porcentagens em peso de titânio iguais ou superiores a 16,5% na solução de H_2TiF_6 , ocorre uma efetiva dissolução da caulinita e outros filossilicatos.

A solução foi diluída em aproximadamente 1:55000 para construção de uma curva de calibração (figura 2) e o teor de TiO_2 foi obtido por colorimetria, A concentração de TiO_2 obtida foi então multiplicada pelo fator de diluição e transformada para porcentagem em peso do elemento (Ti).

Figura 2- Curva de calibração indicando uma proporcionalidade entre absorbância e concentração de TiO_2 na solução diluída.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Produzido o ácido, pesou-se 1 g de cada amostra para reagir com 30 ml de H_2TiF_6 em um tubo de polietileno mantendo-o firmemente fechado. O tubo então é levado ao banho-maria a 45°C por dois dias e agitado periodicamente a cada uma hora. O resíduo obtido foi lavado 3 vezes com 30 ml de HCl N durante 5 minutos na centrífuga, mais duas vezes com HCl 0.1 N durante 10 minutos também na centrífuga, e finalmente 5 vezes com água deionizada. Posteriormente, os oxihidróxidos de ferro foram eliminados com 40 ml de HCl 6N em banho maria por 3 horas a 80°C . Os resíduos assim obtidos foram lavados com água deionizada para eliminar o HCl residual. Por fim, estes foram secados a 40°C por 24h e pesados. Dessa maneira, concentrou-se o anatásio e minerais associados.

2.5. EXTRAÇÃO DE MINERAIS PESADOS

Os grãos e cristais de zircão e demais minerais pesados associados foram extraídos segundo os procedimentos a seguir:

- (i) Trituração de 100 g de amostras de crostas ferruginosas na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) do PPGG_IG-UFPA e desagregação de 100 g das demais amostras em graal de ágata no LaMiGA Container do IG-UFPA;
- (ii) Separação granulométrica através de peneiras de passante a 0,125 mm e retida de 0,063 mm, preservando a fração granulométrica de areia muito fina (0,063-0,125mm) no Laboratório de Sedimentologia do PPGG_IG-UFPA;
- (iii) Separação magnética com caneta magnética no Laboratório de Separação Mineral do PPGG_IG-UFPA;
- (iv) Separação dos minerais pesados, através da técnica do líquido denso (bromofórmio) no Laboratório de Sedimentologia do PPGG_IG-UFPA.
- (v) Seleção dos principais minerais pesados para montagem em fita adesiva dupla face para observações em microscópio eletrônico;
- (vi) Confecção de lâminas de minerais pesados para estudos em microscópio óptico.

2.6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE COM ENERGIA DISPERSIVA (MEV-EDS)

Esta técnica foi empregada tanto para estudo dos minerais principais bem como de zircão e anatásio. Para tal foram obtidas imagens dos distintos aspectos morfológicos e texturais e análises químicas semiquantitativas. Para classificação dos cristais de zircões utilizou-se a metodologia de Pupin (1980) que faz estudo sobre populações de zircões com base em numerosos subtipos que variam nas suas formas. Todas amostras empregadas para esse fim foram metalizadas com ouro para favorecer a condutividade elétrica. Todas essas análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) do PPGG_IG-UFPA com microscópio eletrônico de varredura modelo LEO-1430 e também foram realizadas análises no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LaMiGA) também do PPGG_IG-UFPA, quando se empregou o microscópio eletrônico da marca Hitachi modelo TM 3000 e o sistema EDS 3000 acoplado ao MEV através do software Swift ED.

2.7. ANÁLISES QUÍMICAS

Para avaliação da composição química dos materiais investigados e sua variação ao longo do perfil laterítico e cobertura argilosa foram selecionadas 10 amostras para análises na *Acme Analytical Laboratories (Vancouver) Ltd.* Os elementos maiores foram determinados por ICP-EOS após fusão total das amostras com metaborato/tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico. A determinação dos elementos traços e terras raras ocorreu por ICP-MS, após também passar por fusão total, com metaborato/tetraborato de lítio e também serem digeridos em ácido nítrico, já os metais preciosos e os metais de base foram digeridos com água régia. A perda ao fogo (PF) foi obtida após a calcinação das amostras a 1000 °C

Os resultados foram tratados com o *Excel 2010*, quando além dos cálculos estatísticos básicos, também se gerou diagramas binários a partir das matrizes de correlação. Foram eles $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$; $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-V}$; $\text{Ga-Al}_2\text{O}_3$; $\text{Ga-Fe}_2\text{O}_3$; $\text{Cr-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{TiO}_2\text{-Zr}$; $\text{TiO}_2\text{-ETR}$; $\text{TiO}_2\text{-Nb}$; $\text{TiO}_2\text{-Sn}$; U-Zr ; Ta-Nb ; Zr-ETR ; Hf-Zr ; Y-Zr e Nb-Zr . Os elementos menores e traços foram normalizados segundo a média crustal de Taylor e McLennan 1985 e os ETR segundo o padrão condritico de Evensen, Hamilton e O'nions (1978) e plotados em diagramas multielementares para observar os padrões de distribuição.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

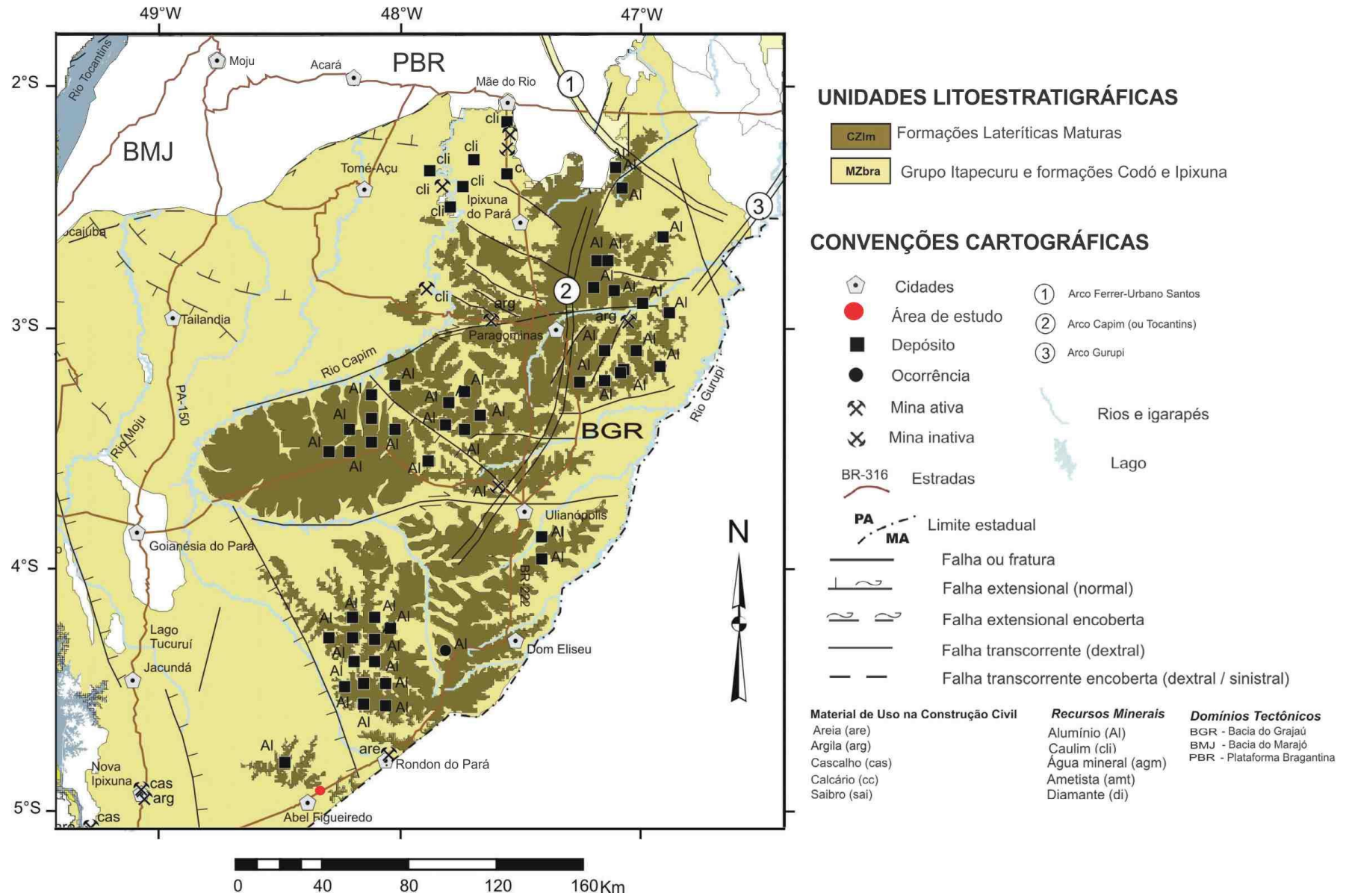
3.1. LITOESTRATIGRAFIA

A região de Abel Figueiredo e Rondon do Pará se situa na porção sudoeste da Bacia do Grajaú. Com mais de 130.000 km², a Bacia do Grajaú se estabeleceu durante os últimos estágios da fragmentação do *Gondwana* no Eocretáceo e limita-se com Arco Ferrer-Urbano Santos a norte, Antéclise Xambioá-Alto Parnaíba a sul, falhas relacionadas ao Lineamento Rio Parnaíba limita a leste com a Bacia do Parnaíba, e o Arco do Capim limita a noroeste com o a Bacia do Marajó (PAZ; ROSETTI, 2001; VASQUEZ; ROSA-COSTA 2008).

Contrariamente ao que foi tradicionalmente considerado no passado, o Arco Ferrer-Urbano Santos não significou uma barreira significativa, assim a Bacia do Grajaú foi considerada como representando a continuidade sul da Bacia São Luís, representando uma depressão rasa marginal ao contexto de grabens intracontinentais, representados pelo sistema de *Graben* do Gurupi (PAZ; ROSETTI 2001). Góes e Rosetti (2001) propuseram uma evolução tectono-sedimentar comum para a Bacia do Grajaú e Bacia de São Luís com base em similaridades em termos estruturais e no preenchimento sedimentar, a última com um posicionalmente mais marginal, agrupando-as na Bacia de São Luís-Grajaú.

Na região de Abel Figueiredo se identificam apenas litologias do Grupo Itapecuru, Formação Ipixuna e Formações Lateríticas Maturas (Figura 3) (VASQUEZ; ROSA-COSTA 2008).

Figura 3 – Geologia da região nordeste-sudeste do Pará. Vide área de estudo do presente trabalho.



Fonte: Modificado de Vasquez e Rosa-Costa 2008.

3.1.1. Grupo Itapecuru

É um espesso pacote sedimentar, predominantemente siliciclástico na porção ocidental da Bacia do Grajaú, formado, sobretudo, por arenitos caulíníticos finos com níveis argilosos e conglomeráticos, que exibem, via de regra, abundante estratificação cruzada e que foram depositados em ambiente fluvial, sob condições climáticas semi-áridas (GÓES 1981; KOTSHOUBEY et al. 2005). Entretanto, trabalhos como de Lima e Rossetti (2001) e Anaisse Jr et al. (2001) mostram influência marinha atribuindo um sistema estuarino-lagunar nos depósitos do Grupo Itapecuru em áreas localizadas nas porções centro-leste e sudoeste da Bacia do Grajaú, respectivamente. Segundo Anaisse Jr et al. 2001 esta unidade conhecida anteriormente como 'Formação Itapecuru' foi formalmente denominado de Grupo Itapecuru após Rossetti (1997) efetuar estudos detalhados na região de Alcântara-MA, onde individualizou três sucessões distintas denominadas de Unidade Indiferenciada, Formação Alcântara e Formação Cujupe.

3.1.2. Formação Ipixuna

Francisco et. al (1971) apud Góes (1981) criaram a denominação Formação Ipixuna para designar o conjunto litológico essencialmente arenoso, rico em caulim e estratificação cruzada, com siltitos e argilitos vermelhos subordinados que ocorrem desde 60 km ao sul de São Miguel do Guamá (PA) até a 31 km ao norte de Imperatriz (MA). Esta formação é exposta na região do Rio Capim na porção leste da Sub-bacia de Cametá do sistema *Graben* do Marajó (ROSSETTI; GÓES, 2004). Santos Jr. e Rossetti (2003) realizaram análises faciológicas em termos de 10 fácies sedimentares agrupadas em duas associações intergradacionais, atribuindo ambientes de complexos fluviais e estuarinos para a Formação Ipixuna.

3.1.3. Formações Lateríticas Maturas

A designação formação laterítica matura é baseada em Costa (1991) que as define como lateritos evoluídos, os quais se apresentam em perfis bem desenvolvidos, com grande variedade de texturas e estruturas singenéticas, e um amplo espectro de espécies minerais. Esta unidade está bem representada nas porções sul-sudeste do Pará, sobre o Grupo Itapecuru e formação Ipixuna e constitui os platôs que formam o relevo atual que geralmente define um relevo tabular fortemente dissecado, cuja altitude decresce de cerca de 400 m até menos de 100 m, em uma distância em torno de 300 km (KOTSHOUBEY et al. 2005). Na região de

Paragominas – Dom Eliseu – Rondon do Pará no sul do Estado do Pará se destaca pela ocorrência de formações lateríticas, com grandes depósitos de bauxitas e caulim associados, ligados a perfis lateríticos maduros (ABREU; COSTA, 2015). Na região em apreço é conhecida a Província Bauxitífera de Paragominas (KOTSCHOUBEY et al. 1997), um extenso e denso agrupamento de depósitos de bauxita na Amazônia.

3.1.4 Formações lateríticas imaturas na região de Abel Figueiredo-Rondon do Pará

Os perfis lateríticos imaturos, como os encontrados na região de Abel Figueiredo-Rondon do Pará, estão distribuídos em grande parte da Amazônia e ao contrário dos maduros, apresentam características típicas de baixo grau de evolução (COSTA, 1991). São de idade pleistocênica e apresentam como critério base para sua distinção dos lateritos maduros a ausência de horizonte bauxítico e/ou de fosfatos de alumínio (COSTA 1991; 1997). Eles formam o relevo dominante na Amazônia representado por superfícies ligeiramente onduladas (COSTA et al. 1996).

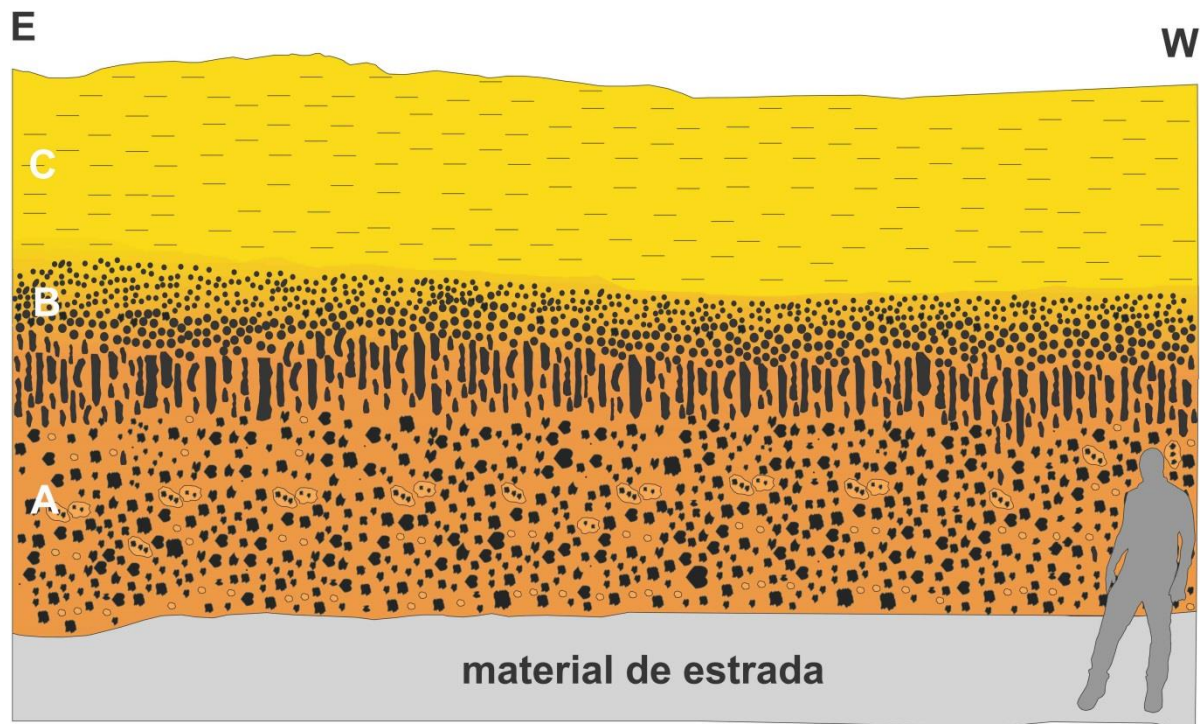
Na região entre Abel Figueiredo e Rondon do Pará, perfis excelentes foram expostos durante a construção da BR-222, com o desenvolvimento de espessas crostas ferroaluminosas imaturas (ABREU; COSTA, 2015). Kotshoubey et al. 2005 realizou observações nesta região e constatou tratar-se de uma cobertura exclusivamente ferruginosa, a qual exhibe uma crosta de fácies nodular a fragmentária na base, feições maciças, cavernosas a colunares na porção intermediária e no topo torna-se novamente nodular.

4. RESULTADOS

4.1. ESTRUTURAÇÃO DO PERFIL LATERÍTICO IMATURO E SUA COBERTURA ARGILOSA EM ABEL FIGUEIREDO-RONDON DO PARÁ.

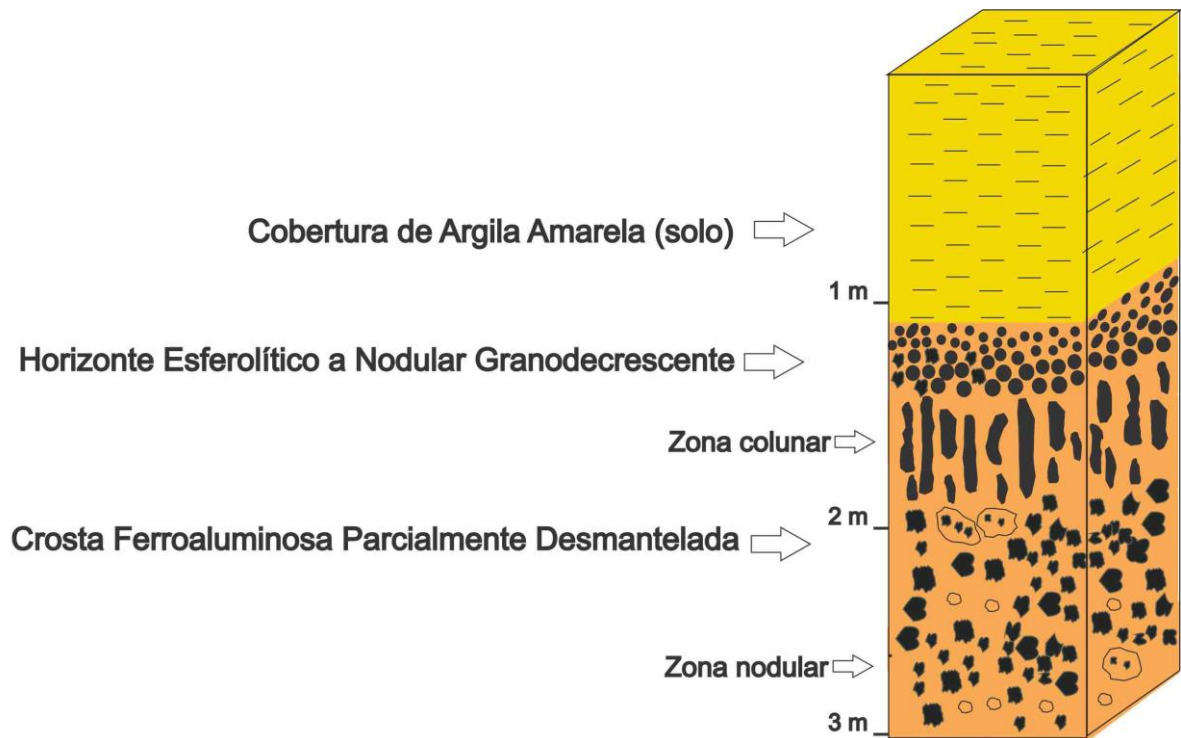
O perfil laterítico imaturo do km 137 da BR-222 (figura 4 e 5) pode ser compartimentado em três horizontes distintos: crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada na base, seguido pelo horizonte esferolítico a nodular granodecrescente e no topo cobertura de argila amarela (solo), descritos a seguir. O horizonte mosqueado foi observado apenas em poços escavados.

Figura 4 – Seção esquemática do perfil laterítico do km 137 da BR-222 mostrando os horizontes identificados: crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada (A), horizonte esferolítico a nodular granodecrescente (B) e cobertura de argila amarela (solo) (C).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 – Perfil laterítico do km 137 da BR-222 com os horizontes identificados.



Fonte: Elaborado pelo autor

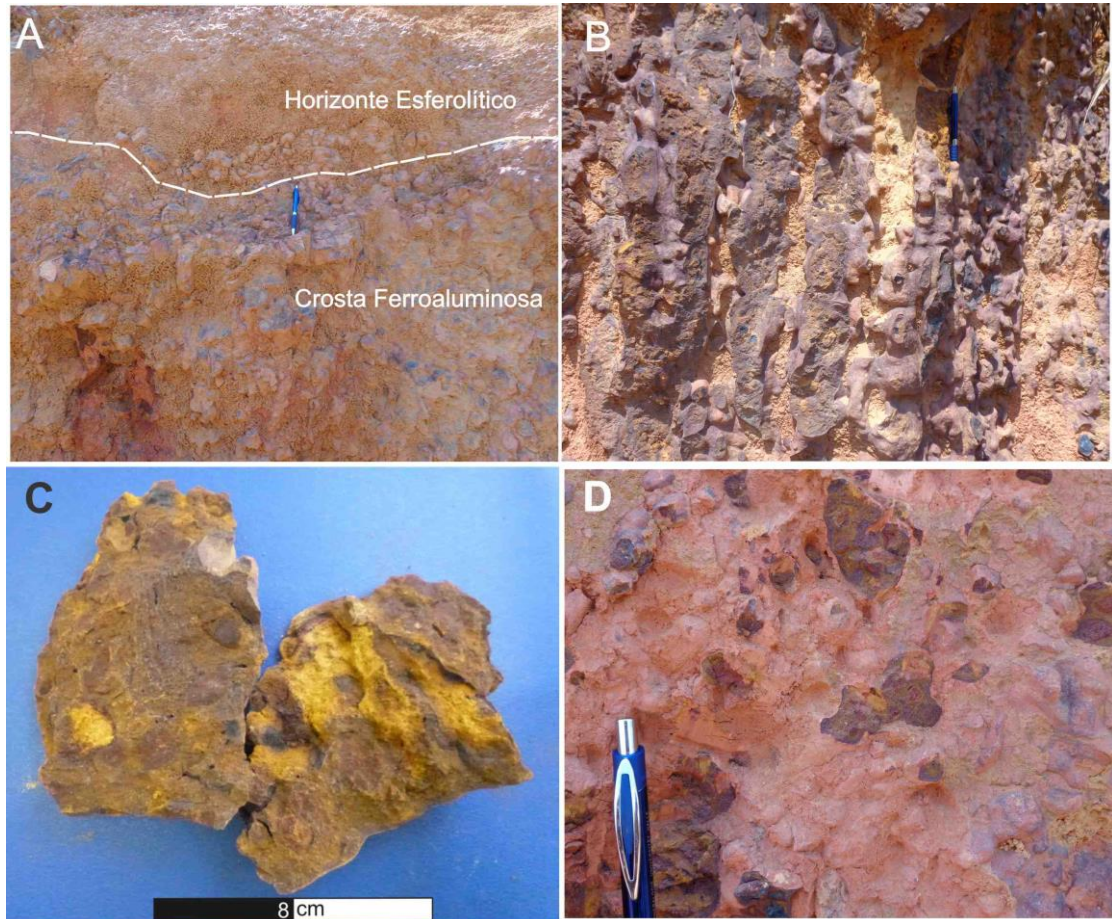
4.1.1. Morfologia e mineralogia dos horizontes

4.1.1.1. Crosta Ferroaluminosa Parcialmente Desmantelada (CFPD)

A crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada apresenta espessura máxima de 2,0 m e está em contato gradacional com o horizonte esferolítico acima (figura 6A). As crostas se encontram inalteradas a fortemente alteradas pelo intemperismo e pela erosão física. Geralmente apresentam aspecto colunar mesoscópico (figura 6B e C), em colunas de oxi-hidróxidos de Fe marrons claros a escuros, por vezes vermelhos, que paralelizam com zonas silto-argilosas amarelas, muitas vezes ainda com resíduos do material colunar, já assumindo feições de nódulos e até mesmo esferólitos. A zona compacta, colunar ou não, é dura, tem internamente aspecto sub-nodular, com auréolas sub-concêntricas impressas por bandas de tonalidades diferenciadas do marrom e do vermelho, por vezes ocre. O material terroso tende a ser de aspecto argiloso a terroso. Grãos milimétricos de quartzo em contornos irregulares, límpidos, quebradiços, estão distribuídos ao longo de todo material. Essas crostas também são microporosas, e cavernosas e apresentam nódulos ferruginosos geralmente recobertos por películas marrons

escuras de hidróxidos de ferro (figura 6D). As crostas são constituídas essencialmente por goethita, hematita, caulinita e quartzo (figura 7).

Figura 6 – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada. A) Contato gradacional entre crosta ferroaluminosa e horizonte esferolítico; B) Estrutura colunar com canais preenchidos por material argiloso; C) Fragmentos da crosta colunar; D) Nódulos de hematita.



Fonte: Elaborado pelo autor

Sob o microscópio ótico as crostas se apresentam como um plasma marrom avermelhado, com nódulos e esferólitos intraplasma, todos constituídos de goethita, hematita e ainda caulinita, os quais cimentam os grãos irregulares de quartzo (figuras 7A e B). Estes ocorrem preenchendo parcialmente os diversos poros de dissolução envolvidos pelo plasma ferruginoso. Feições típicas de soluções coloidais estão presentes no plasma predominantemente férrico (figura 8D, 9A e B).

Sob microscópio eletrônico observa-se feições subesféricas e levemente esféricas formadas por aglomerados de cristais placosos de hematita e goethita, os quais também ocorrem preenchendo poros em meio ao plasma ferruginoso (figura 9C, D e E).

Figura 7 – Difratoogramas de raios X de amostras da crosta ferroaluminosa. A) nódulos ferruginosos da crosta ferruginosa; B) matriz argilosa da crosta ferruginosa desmantelada. Caulinita (Kln); goethita (Gt); hematita (Hem); quartzo (Qtz).

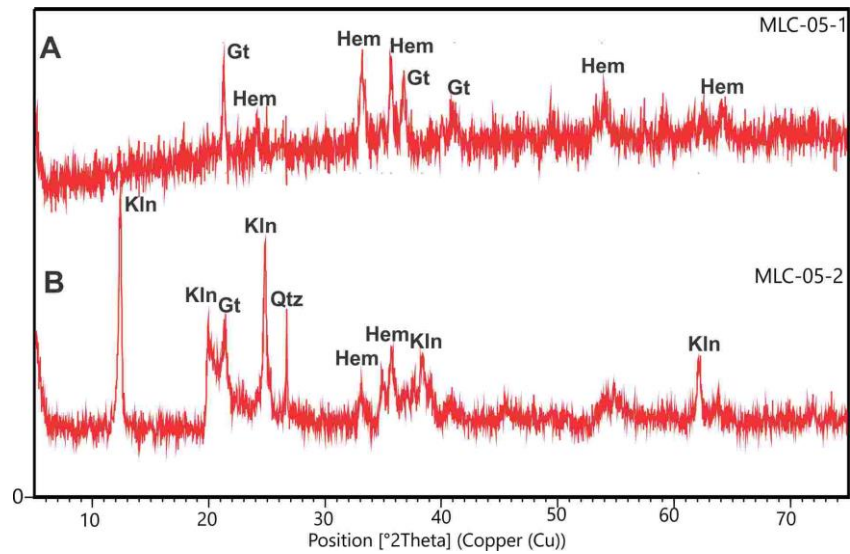
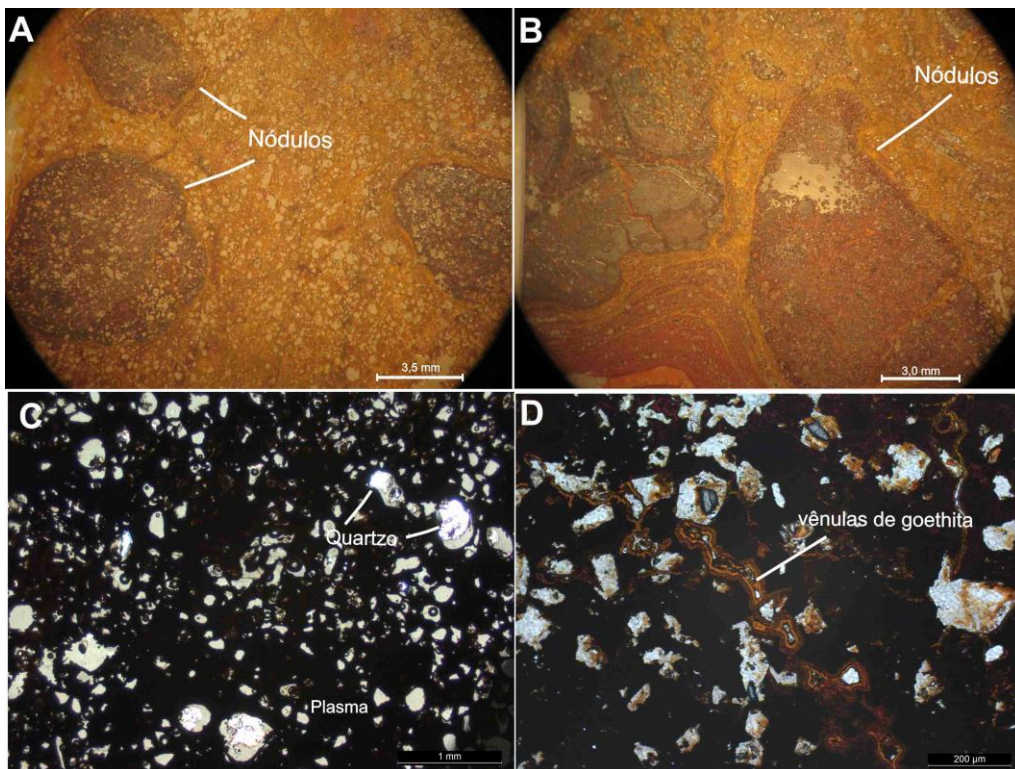
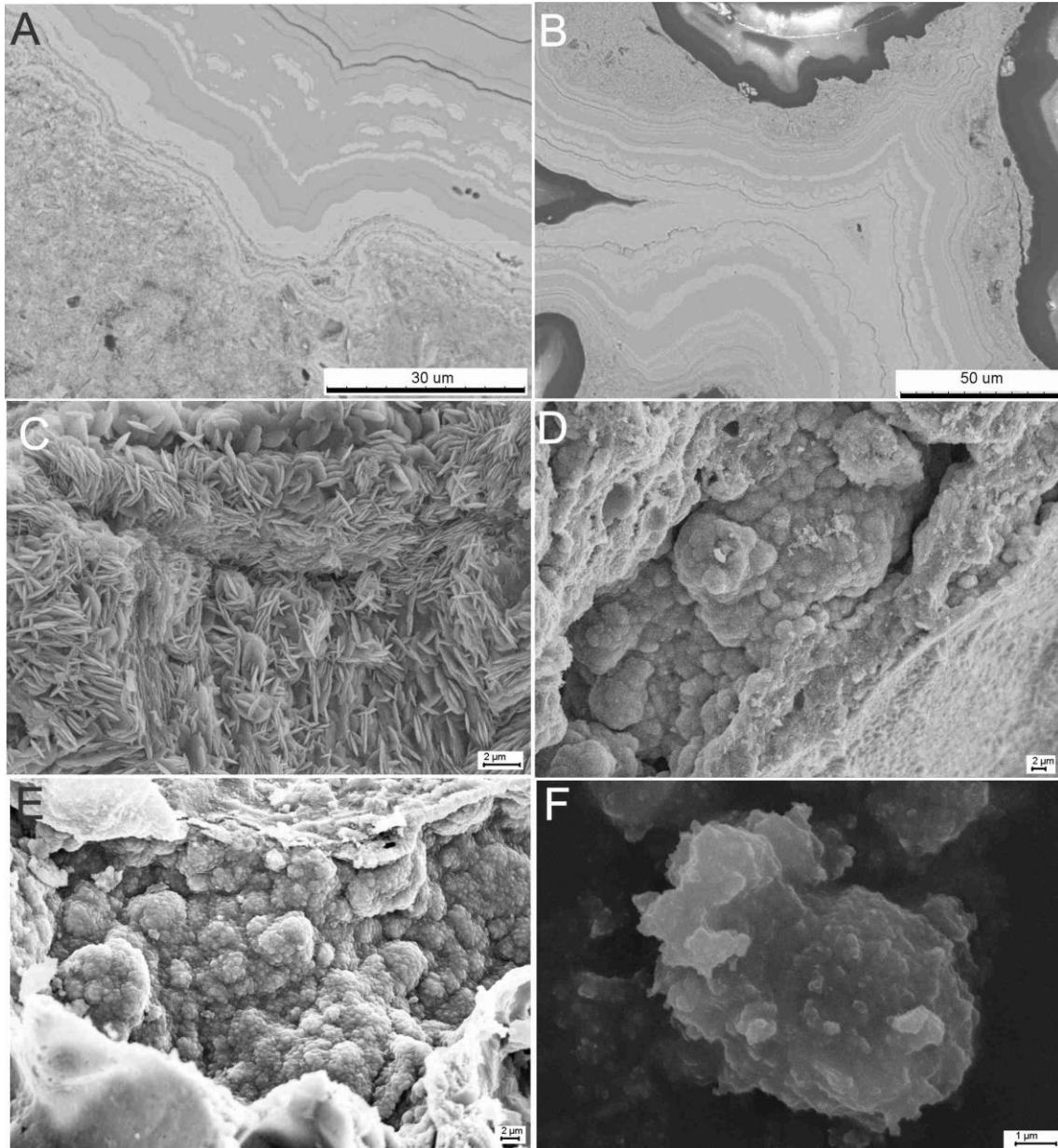


Figura 8 – Fotomicrografias da crosta ferroaluminosa. A) e B) nódulos da crosta ferruginosa; C) Exibe poros preenchidos parcialmente por grãos de quartzo e mostrando o plasma ferruginoso microcristalina; D) Vênulas de goethita de textura coloidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Imagens de MEV da crosta ferroaluminosa parcialmente dismantelada. A) e B) Plasma formado pelos oxi-hidróxidos de ferro com nódulos intraplasma. C) Detalhe mostrando agregados de hematita e goethita. D) e E) Detalhe mostrando agregados esféricos de hematita e goethita preenchendo poros. F) cristal de goethita placóide de contornos arredondados.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.1.2. Horizonte Esferolítico a Nodular Granodecrescente (HES)

O horizonte esferolítico alcança até 1 m de espessura e está em contato brusco com a cobertura argilosa. Seus esferólitos são de cor marrom avermelhada escura e estão envolvidos por matriz argilosa a terrosa de coloração marrom amarelada (figura 10). O diâmetro varia de 0,2cm a 5cm de diâmetro ou

comprimento, por vezes ainda maior, cujo valor é nitidamente granodecrescente para o topo. Esses nódulos são envolvidos por capa de igual composição da matriz.

Figura 10 – Esferólitos grandes e pequenos do horizonte esferolítico exibindo internamente coloração marrom avermelhada escuro e externamente são envolvidos por uma matriz argilosa amarelada. Enquanto o núcleo é de material criptocristalino (plasma) vermelho típico a borda tende a marrom escura, e ambos envolvem grãos angulosos, quebradiços de quartzo.

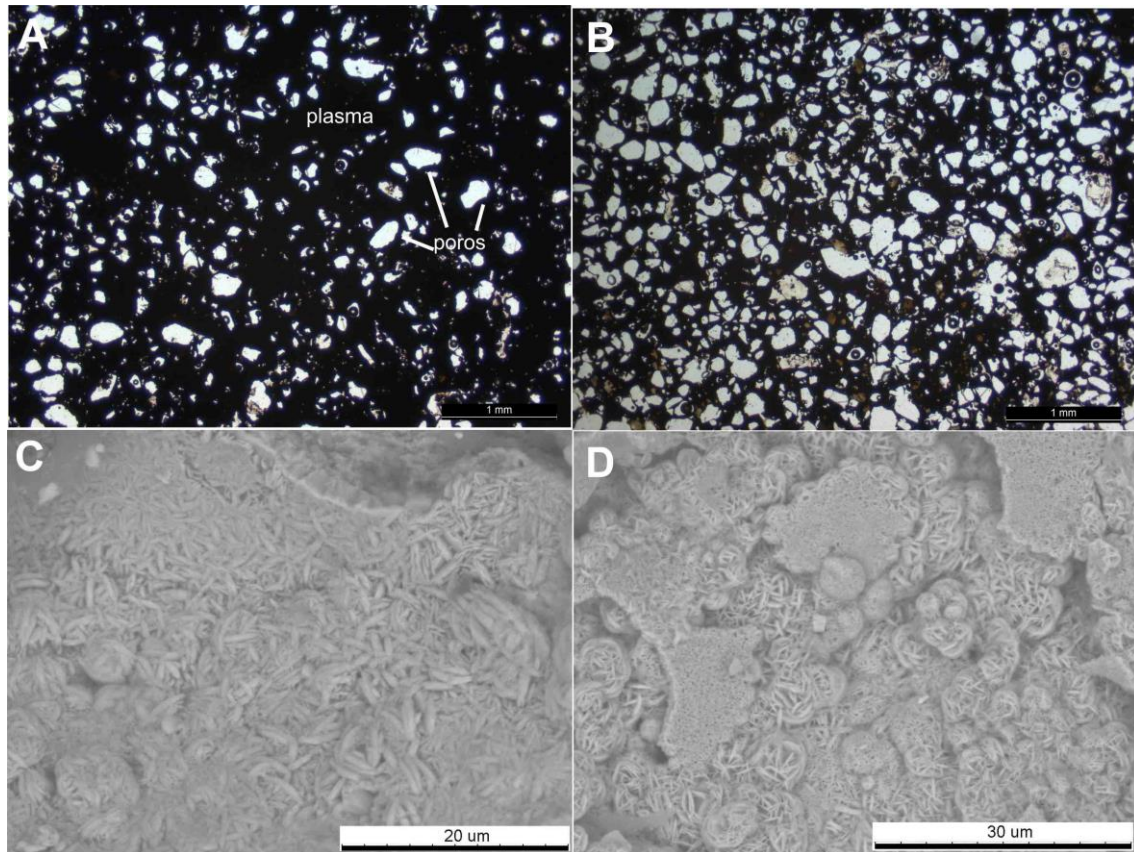


Fonte: Elaborado pelo autor.

O plasma coloração marrom avermelhado escuro é formado por oxihidróxidos de ferro (hematita no centro e goethita na borda) (figura 11). Esse plasma envolve grãos fraturados e corroídos de quartzo (figura 12A e B). Caulinita encontra-se também disseminada no plasma e em torno dos grãos de quartzo. Muitos dos poros encontrados parecem produtos de dissolução parcial dos grãos de quartzo, como foi observado em Truckenbrodt et al. (1995), Boulangé e Carvalho (1997), Delvigne (1999), Kotschoubey et al. (2005) e Costa et al. (2014a).

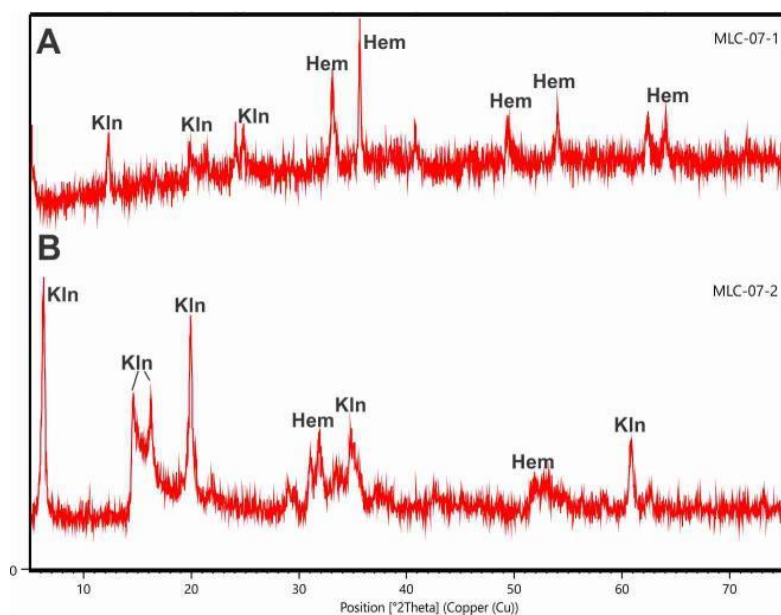
Em imagens de MEV se apresentam como agregados de cristais tabulares ou discos subcirculares paralelos ou perpendiculares entre si, por vezes descrevendo formações subesféricas, e a morfologia cristalina reflete domínio de hematita (figura 11C e D).

Figura 11 – Fotomicrografias de porções do interior dos esferólitos do horizonte esferolítico. A) e B) plasma ferruginoso cimentando grãos quartzo com morfologia e tamanhos variados sob o microscópio ótico e nicóis x. C) e D) Esse mesmo plasma observado sob MEV mostrando os cristais tabulares e discoides de hematita, e em parte goethita. Eles guardam a mesma morfologia observada na crosta ferruginosa da figura 10.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Difratoformas de raios x de amostras do horizonte esferolítico. A) De esferólitos individuais; B) Da matriz argilosa amarelada. Caulinita (Kln); hematita (Hem).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.3. Cobertura de Argila Amarela (Solo) (CAR)

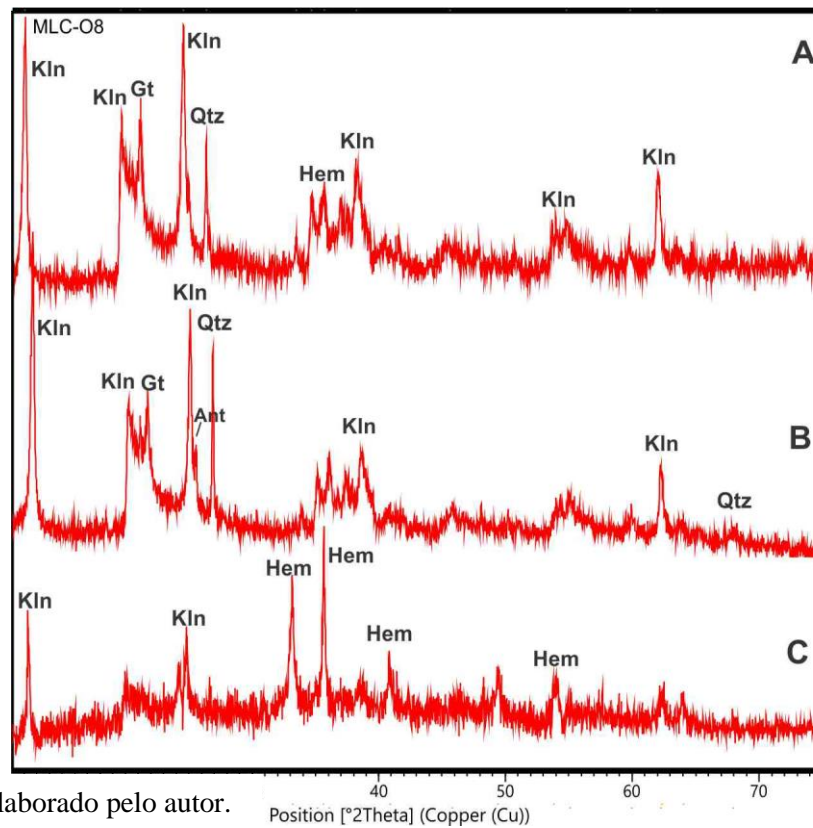
A cobertura argilosa com 1,0 m de espessura média é de cor amarela, silto-argilosa, de consistência terrosa, com esferólitos ferruginosos marrons avermelhados no interior e película marrom clara, de poucos centímetros de diâmetro. No conjunto, em termos de cor e granulometria, se apresenta como homogêneo, embora a cor se torne mais amarelo pálido para o topo. Também observa-se alguns agregados irregulares de material argiloso, pulverulentos sob pressão dos dedos (grumos), que chegam até 3 cm de diâmetro (figura 13). A cobertura argilosa no seu todo se constitui de caulinita, goethita, hematita, quartzo e anatásio (figura 14), em que os esferólitos são dominados, como nos horizontes anteriores, por hematita, e por vezes caulinita.

Figura 13 – Exemplo de amostra da cobertura argilosa exibindo o aspecto grumoso e os esferólitos ferruginosos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Difratoograma de raios X de amostras da cobertura argilosa. A) Cobertura de argila (mineralogia geral); B) Grumos; C) Esferólitos. Caulinita (Kln); goethita (Gt); hematita (Hem), quartzo (Qtz), anatásio (Ant).

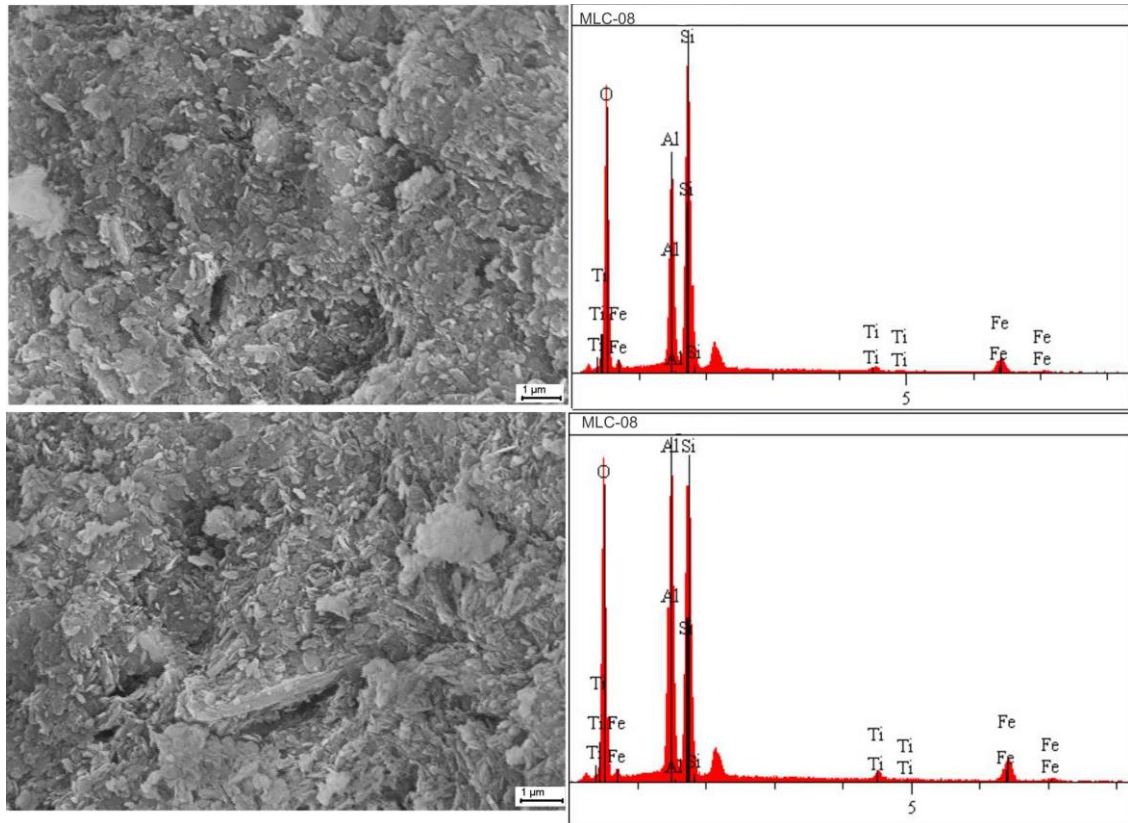


Fonte: Elaborado pelo autor.

Position [$^{\circ}2\theta$] (Copper (Cu))

Em escala de microscopia eletrônica observa-se a textura argilosa irregular e desordenada constituída por agregados micrométricos de caulinita, quartzo e goethita em menor proporção (figura 15).

Figura 15 – Imagem de MEV com espectros de EDS de material da cobertura argilosa (solo) mostrando o domínio de caulinita em cristais submicrométricos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O perfil laterítico imaturo e sua cobertura argilosa são constituídos fundamentalmente de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 (tabela 1), que sozinhos correspondem em média a 86,8 % da composição química, porém quando somados a perda ao fogo (PF) chegam à média de 99,6 %. As concentrações destes componentes químicos mudam gradualmente entre os horizontes e de forma mais brusca com a cobertura, o que é similar ao topo de perfis lateríticos transformados ou providos de cobertura tipo latossolos amarelo. Essa variação química espelha a constituição mineralógica variável e representada por caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio (COSTA, 1991; COSTA et., 2014a).

Os teores de SiO_2 variam de 7,9 a 42,97 %, com sua maior concentração na cobertura argilosa (figura 16). A matriz argilosa da crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada e do horizonte esferolítico mostram teores de SiO_2 altos e relativamente constantes (33,74 a 37,96 %). Os valores de Al_2O_3 também são mais elevados na cobertura argilosa e na matriz argilosa da crosta ferroaluminosa desmantelada e horizonte esferolítico (28,97 a 33,73 %). Esses valores de SiO_2 e Al_2O_3 refletem o domínio variável de caulinita, além de quartzo, mais restrito. Os teores de Fe_2O_3 apresentam um comportamento inverso ao de SiO_2 e Al_2O_3 , demonstrando, de fato, se tratar de um perfil laterítico (figura 18A e D) . Eles oscilam entre 7,89 e 73,49 %, sendo que seu maior valor se dá na base da crosta ferruginosa nodular parcialmente desmantelada e menores valores na cobertura e matriz da crosta ferruginosa e dos esferólitos.

Os teores de TiO_2 , que oscilam entre 0,38 a 2,28 %, comportam fundamentalmente ao anatásio, encontrado como acessório ao longo do perfil laterítico imaturo, e está mais concentrado na matriz argilosa e na cobertura. A perda ao fogo varia de 9,2 a 15,6 % e retrata a presença de caulinita e goethita. Os demais componentes como Na_2O , K_2O , CaO e MgO apresentam concentrações muito baixas, menores do que 0,05 % tanto no perfil imaturo como na cobertura argilosa. Provavelmente, se presentes na rocha mãe, foram lixiviados por completo no topo do perfil, portanto um intenso e prolongado processo de alteração intempérica sobre a rocha fonte (NESBITT; YOUNG, 1982), sendo compatível com a composição química dos perfis imaturos (COSTA, 1991).

Tabela 1- Composição química expressão em % em peso (elementos maiores) e ppm (elementos traços) confrontadas com a média crustal (MC) com base em Taylon & McLennan 1985. Legenda: Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada base: CFNPDB; Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada topo: CFNPDT; Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada: CFCPD; Horizonte esferolítico a nodular: HES; Cobertura argilosa: CAR.

Elem.	CFNPDB		CFNPDT		CFCPD		HES		CAR		MC
	Fragmento	Matriz	Fragmento	Matriz	Fragmento	Matriz	Esferólitos	Matriz	Base	Topo	
SiO ₂	7,90	35,83	9,93	33,74	9,40	39,09	20,12	37,96	40,69	42,98	65,9
Al ₂ O ₃	8,33	30,48	9,54	28,97	9,30	33,73	17,26	32,28	33,61	30,87	15,2
Fe ₂ O ₃	73,49	18,36	70,23	21,94	68,26	9,97	52,13	13,4	8,35	7,89	4,99
TiO ₂	0,46	1,67	0,5	1,55	0,38	1,71	0,86	1,69	1,91	2,28	0,65
MgO	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,02	0,03	0,04	2,21
CaO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,01	0,02	0,02	4,20
K ₂ O	0,01	0,02	<0,01	0,02	<0,01	0,03	<0,01	0,02	0,03	0,03	3,36
Na ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,90
PF	9,3	13,4	9,2	13,5	12,1	15,3	9,3	14,4	15,1	15,6	-
TOTAL	99,57	99,78	99,46	99,76	99,52	99,85	99,71	99,83	99,82	99,75	-
Sc	18	15	20	16	20	14	13	14	14	14	13
V	2066	476	2608	684	2419	237	1201	303	185	176	110
Cr	424,2	185	547,4	219	253,1	143,5	554,2	177,9	136,8	123,2	85
Mn	<77,4	77,4	<77,4	77,4	<77,4	77,4	<77,4	77,4	77,4	154,9	600
Co	0,9	1	1,1	1,1	0,9	1,1	0,4	0,9	1,2	1,6	17
Ni	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	50
Cu	14,6	3,4	23,2	8	26,4	1,2	1,4	1,4	0,9	1	25
Zn	2	3	4	4	6	4	<1,0	3	4	4	71
Ga	66,5	49,8	73,1	53,7	36,6	45,5	68,5	48,6	45,7	39,5	17
As	29,8	6,3	31,9	9,3	40,2	2,8	46,6	5,1	1,8	1,4	1,5
Rb	<0,1	0,4	<0,1	0,4	0,1	0,7	<0,1	0,5	0,8	1	112
Sr	1,9	11,2	2,6	10,2	1,6	11,4	3,9	10,7	13,3	13,4	350
Y	6,8	17,6	9	15,9	6	15,9	7,8	17,2	18,4	25,5	22
Zr	302,8	847,3	317,9	738	238,9	698	437,4	737,6	970,6	1453,9	190
Nb	8,8	30,9	9,5	28	6,3	31,2	14,8	30,5	36,3	43,4	12,5
Mo	4,9	1	6,9	1,8	3,8	0,7	10,2	1,1	0,6	0,5	1,5
Ag	0,7	0,1	1,2	0,3	0,4	<0,1	1,6	0,2	<0,1	<0,1	-
Sn	2	5	2	5	1	5	3	5	6	5	5,5
Sb	2,8	0,3	3,2	0,6	2,7	0,1	1,9	0,2	0,1	<0,1	0,2
Ba	1	14	4	15	2	15	4	16	15	16	550
Hf	7,8	20,9	8,6	18,8	5,8	18,8	11,1	19,5	24,7	36,8	5,8
Ta	0,7	2,3	0,7	2,2	0,5	2,4	1,1	2,4	2,7	3,4	1,0
Hg	0,86	0,18	1,01	0,31	0,65	0,2	1,21	0,28	0,21	0,16	-
Pb	53,3	12,3	65,6	19,7	44,2	3,8	26,4	6,3	2,8	2,8	16
Th	48,6	38,2	51	38,8	32,8	32,3	34,8	35,1	33,3	34,7	10,7
U	3,9	3,1	4,6	3,1	4,5	2,4	1,7	2,7	2,8	4,1	2,8

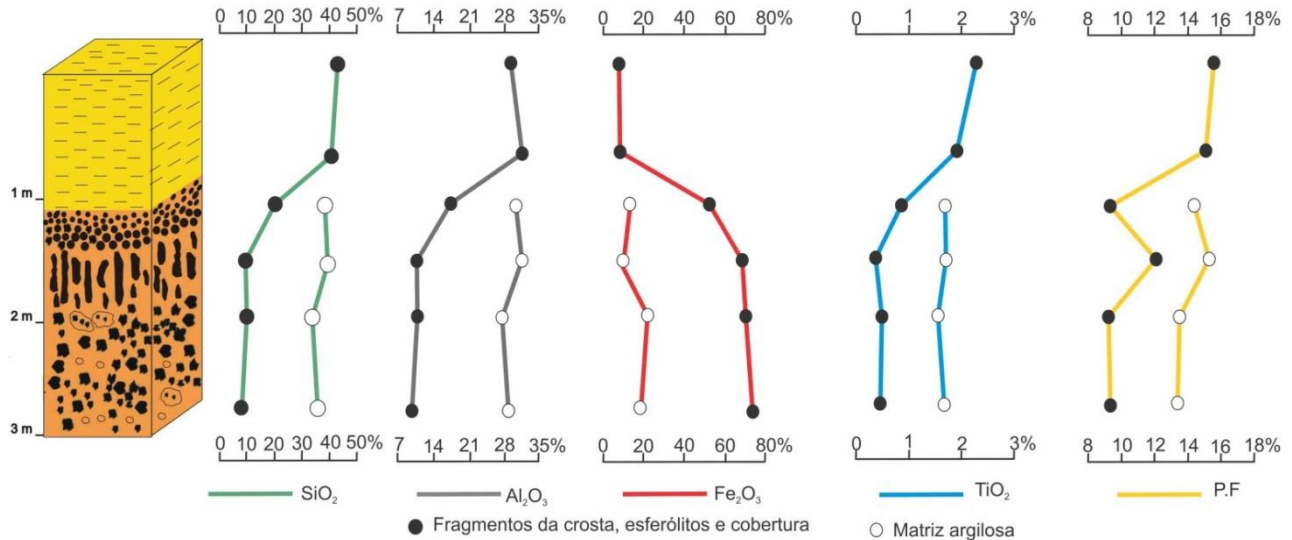
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Composição química expressão em ppm (elementos terras raras) confrontadas com a média crustal (MC) com base em Talyon & McLennan 1985. Legenda: Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada base: CFNPDB; Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada topo: CFDT; Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada: CFPCD; Horizonte esferolítico a nodular: HES; Cobertura argilosa: CAR.

Elem.	CFNPDB		CFNPDT		CFPCD		HES		CAR		MC
	Fragmento	Matriz	Fragmento	Matriz	Fragmento	Matriz	Esferólitos	Matriz	Base	Topo	
La	4,9	24	8,3	21,6	5,9	19,5	8	21,2	20,2	18,5	30
Ce	6	29,2	14,1	28,2	7,5	24	9,4	25,2	26,4	24,7	64
Pr	0,85	2,88	1,89	2,92	1,22	2,44	1,05	2,6	2,77	2,52	7,1
Nd	2,7	8,7	7,3	9,5	4,7	7,4	3,3	8,3	8,1	8	26
Sm	0,47	1,49	1,8	1,8	0,95	1,47	0,59	1,44	1,59	1,61	4,5
Eu	0,17	0,36	0,45	0,48	0,22	0,36	0,14	0,29	0,41	0,44	0,88
Gd	0,65	1,87	1,85	1,99	1,12	1,7	0,79	1,53	1,82	2,2	3,8
Tb	0,14	0,37	0,34	0,39	0,21	0,33	0,17	0,36	0,41	0,51	0,68
Dy	1,07	2,73	2,33	2,91	1,49	2,61	1,24	2,48	3	3,95	3,5
Ho	0,25	0,71	0,49	0,66	0,28	0,6	0,31	0,55	0,72	0,96	0,8
Er	0,84	2,19	1,48	2,21	0,87	2,04	1,1	2,19	2,52	3,38	2,3
Tm	0,15	0,4	0,23	0,39	0,13	0,35	0,2	0,39	0,46	0,58	0,33
Yb	1,17	2,91	1,67	2,83	1,05	2,69	1,35	2,83	3,34	4,35	2,2
Lu	0,19	0,49	0,24	0,45	0,16	0,43	0,23	0,46	0,23	0,46	0,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Distribuição das concentrações dos elementos maiores ao longo do perfil laterítico imaturo da BR-222, km 137. SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e TiO₂ e P.F.

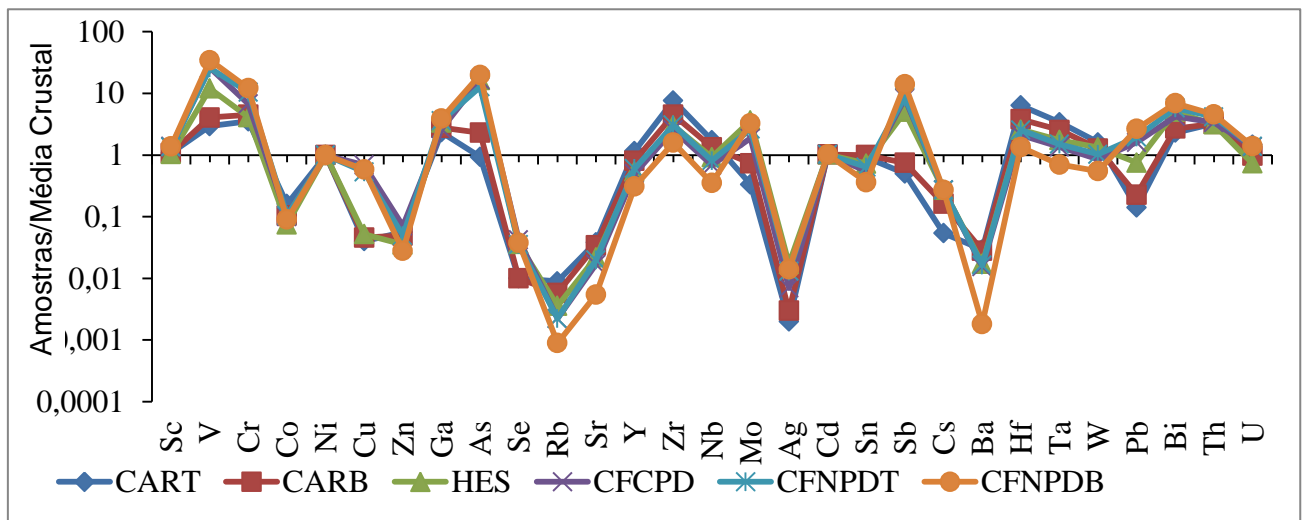


Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre os elementos traços no perfil laterítico imaturo e cobertura destacam-se relativo à média crustal os valores de Zr, V, Cr, Nb, Hf, Ta, Ga, Pb, Th, As, Mo e Sb. Os elementos, de modo geral, apresentam uma ampla variação, sendo as concentrações de Co, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Ba, Hf e Ta maiores na matriz da crosta ferroluminosa parcialmente desmantelada, matriz dos esferólitos e cobertura argilosa, enquanto V, Cr, Cu, Ga, As, Mo, Ag, Sb, Hg e Pb apresentam maiores teores nos fragmentos de crostas e esferólitos.

As concentrações de elementos traços estão ora abaixo da média crustal (Zn, Ni, Ba, Co, Sr, Rb, Ag e Mn) ora próximo desta (Ta, U, Sn, Sc), enquanto Zr, V, Cr, Th, Ga, As e Hf se encontram com valores acima da média, estes geralmente ligados aos óxi-hidróxidos de ferro (COSTA et al., 2014a). As concentrações de Pb estão acima da média crustal nos fragmentos da crosta e esferólitos e abaixo na matriz e cobertura, enquanto no Nb a média crustal está acima nos valores da cobertura e matriz e abaixo nas crostas/esferólitos (figura 17).

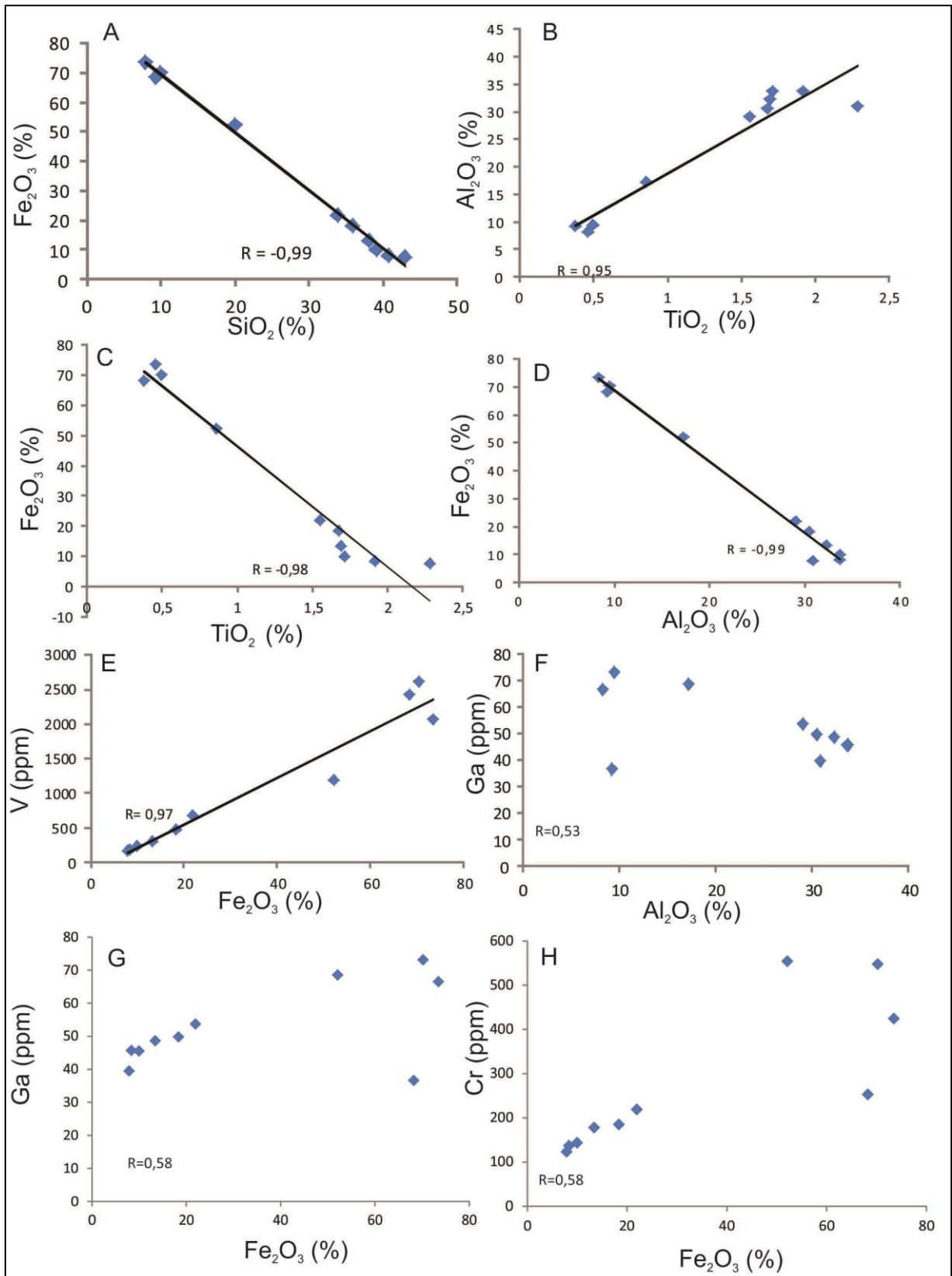
Figura 17 – Padrão de distribuição dos elementos traços confrontadas com a média crustal de Taylor & McLennan 1985. Legenda: Cobertura argilosa topo (CART), Cobertura argilosa base (CARB), Horizonte esferolítico (HES), Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada (CFCPD), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Base (CFNPDB).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os elementos maiores, Fe_2O_3 e SiO_2 apresentam forte correlação negativa, sendo este comportamento inverso típico em perfis lateríticos (COSTA, 2007). Este fato, ainda, é reforçado pela correlação significativa e positiva entre Al_2O_3 e TiO_2 ($R=95$ figura 18B). Fe_2O_3 e TiO_2 , e Fe_2O_3 e Al_2O_3 também apresentam forte correlação negativa (figura 18C e D). Ferro e vanádio apresentam excelente correlação linear positiva (figura 18E) e a correlação alumínio com gálio negativa, em aparente contradição com suas afinidades geoquímicas (figura 18F), mas de acordo com as observações de Costa et al. (2014a). As correlações Fe_2O_3 e Ga- Fe_2O_3 e Fe_2O_3 e Cr são moderadas.

Figura 18 – Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa da BR-222, km 137.

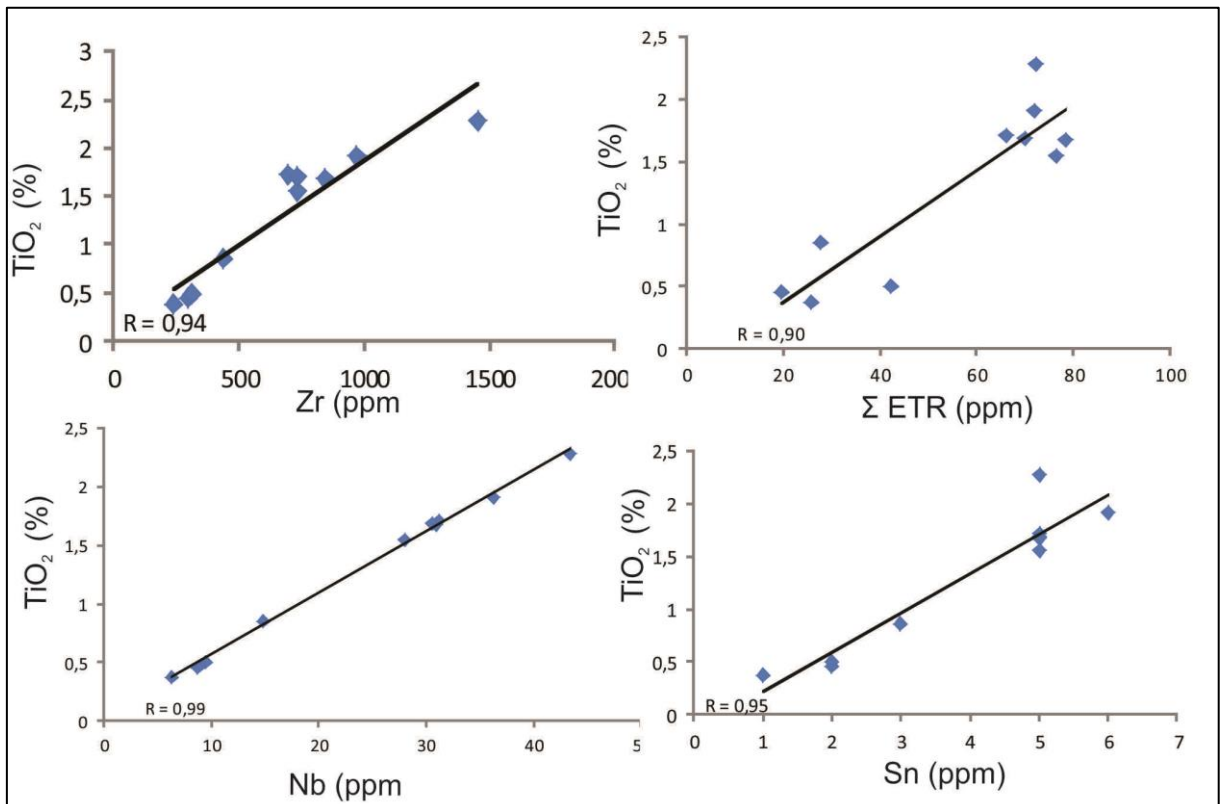


Fonte: Elaborado pelo autor.

As correlações positivas entre os elementos traços e TiO_2 (figura 19) reforçam importância do anatásio e zircão (figura 20), com destaque para Zr, Hf, Nb, Ta, Y e U, estrutura de minerais estáveis, como zircão ou neoformados e estáveis como o anatásio (COSTA et al. 2014a; PANTOJA, 2015).

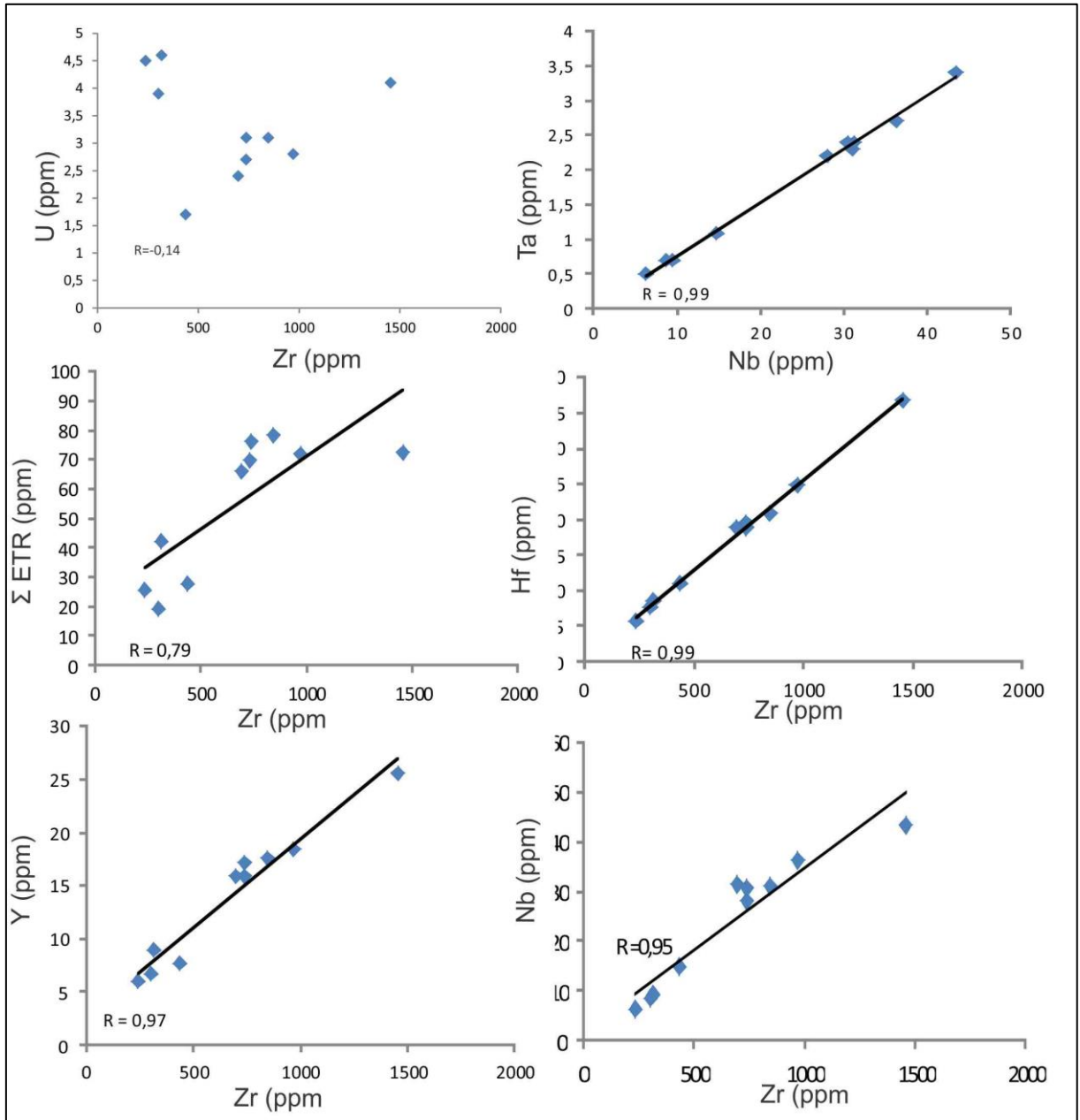
Algumas correlações entre os elementos traços são muito significativas. Zr-Hf é linear muito significativa e reforça a presença de zircões com similar razão Zr/Hf em todo o perfil, inclusive na cobertura, da mesma forma Nb/Ta, sugerindo o mesmo mineral e fonte comum. As correlações positivas Zr – ETR e TiO_2 – ETR permitem prevê que os ETR estejam relacionados ao zircão e em parte ao anatásio. Por sua vez U e Zr mostram duas populações distintas, em que os valores mais altos de U estão nitidamente relacionados com o domínio de hematita e goethita (Figura 20 e Tabela 1).

Figura 19 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa na BR-222, km 137.



Fonte: Elaborado pelo autor.

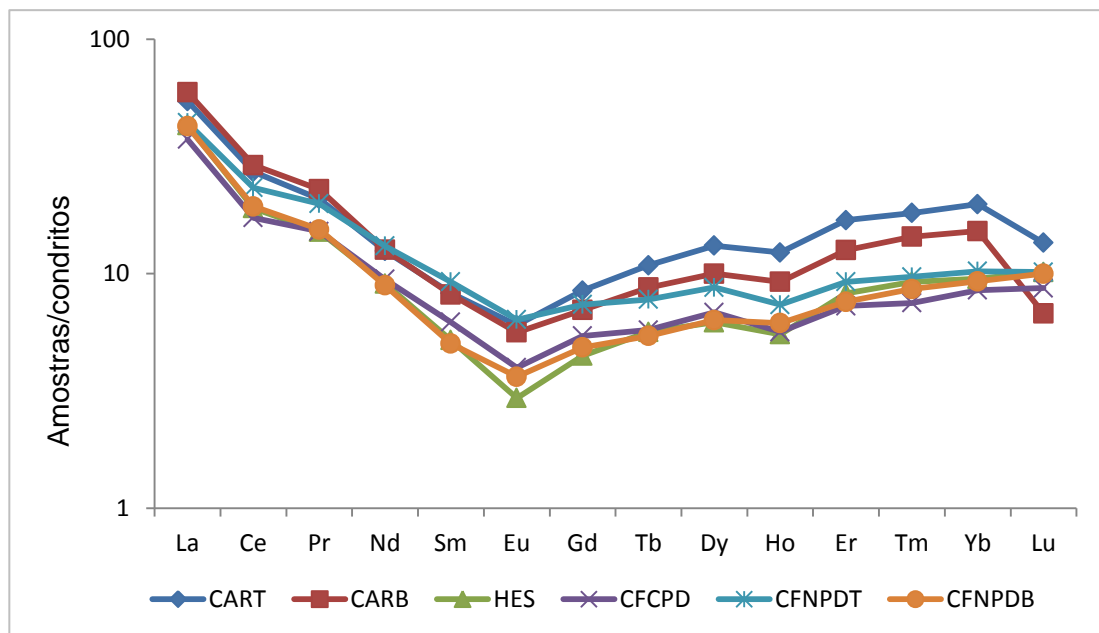
Figura 20 - Correlações geoquímicas no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa na BR-222, km 137.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As concentrações dos ETR estão abaixo da média crustal (tabela 2) e aumentam em direção a cobertura argilosa e na matriz argilosa. As curvas normalizadas aos condritos apresentam padrões semelhantes entre si, exibem forte anomalia negativa de Eu e ligeira negativa de Ce, com tendência a enriquecimentos dos ETRP, em parte comparável outros perfis lateríticos da região amazônica (HORBE; COSTA 1997; 1999; COSTA et al., 2014a) e de forma semelhante ao observado por Kotschoubey et al. (2005) em perfis laterito-bauxíticos da região de Paragominas.

Figura 21 – Padrão de distribuição dos ETR normalizados aos condritos. Legenda: Cobertura argilosa topo (CART), Cobertura argilosa base (CARB), Horizonte esferolítico (HES), Crosta ferroaluminosa colunar parcialmente desmantelada (CFCPD), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta ferroaluminosa nodular parcialmente desmantelada Base (CFNPDB).

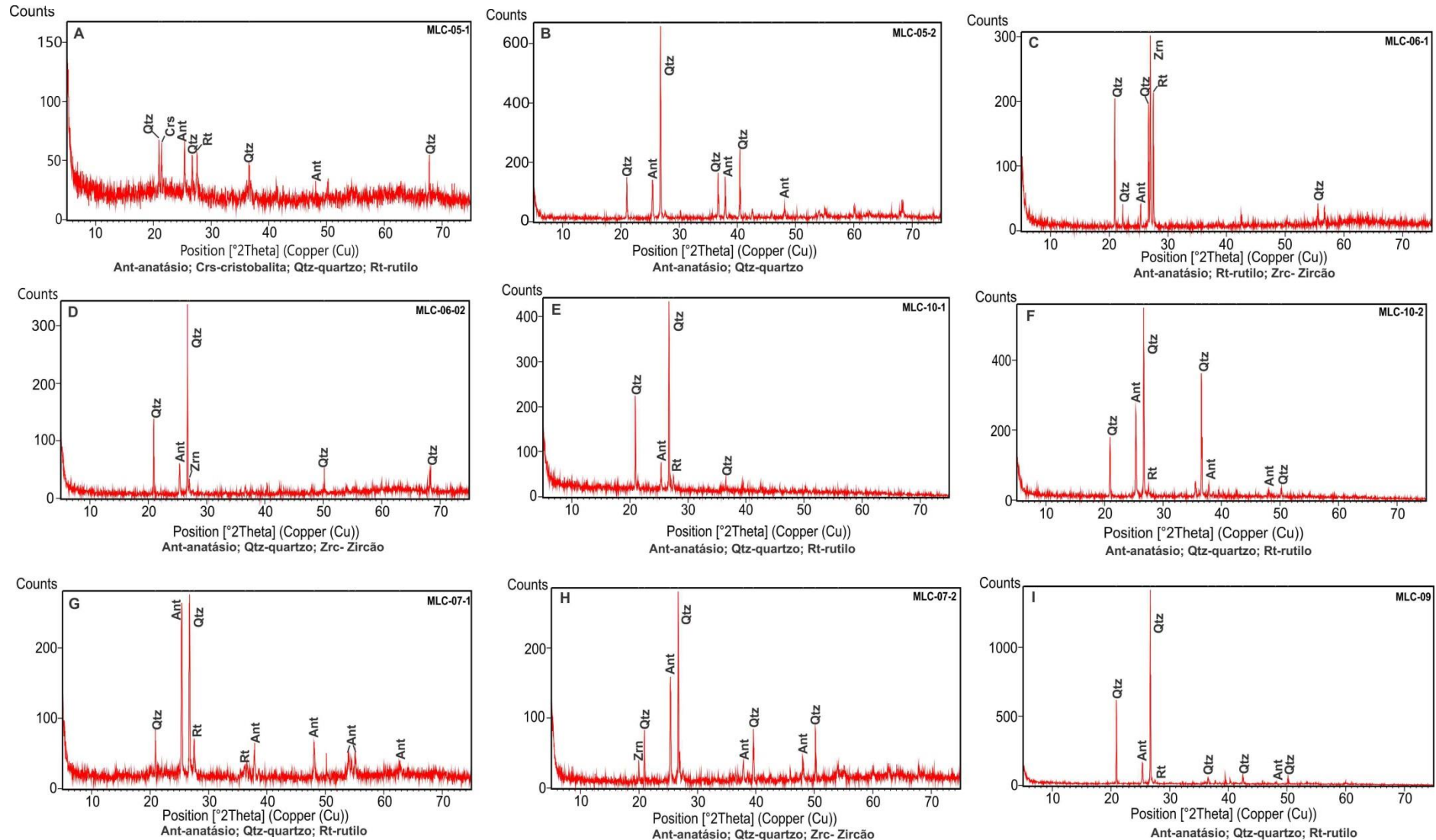


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. ANATÁSIO

Os resíduos químicos obtidos constituem-se fundamentalmente de anatásio, rutilo, zircão, cristobalita e quartzo (Figura 22). O anatásio está presente em todos os resíduos obtidos, da mesma forma o quartzo enquanto o zircão foi identificado apenas nos resíduos da zona superior da crosta ferroaluminosa (figura 22D) e horizonte esferolítico (zona esferólitos) (figura 22G). A cristobalita parece um produto neoformado, por conta de resíduos de SiO_2 do tratamento químico.

Figura 22 - Difratoformas de raios x mostrando a composição mineralógica dos resíduos extraídos quimicamente das amostras do perfil imaturo. Figura 22A – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada inferior (zona crosta); 22B – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada inferior (zona matriz); 22C – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada superior (zona crosta); 22D – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada superior (zona matriz); 22E - Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada colunar (zona colunar) 22F – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada colunar (zona matriz); 22G – Horizonte esferolítico (zona esferólitos); 22H – Horizonte esferolítico (zona matriz); 22I – Cobertura



Fonte: Elaborado pelo autor.

O anatásio ao longo do perfil laterítico e cobertura argilosa se apresenta em aglomerados de cristalitos menores que 400 nm (figura 23 e 24) de modo similar ao observado por Costa et al. (2014b) em amostras da cobertura argilosa da mina de bauxita de Juruti. Não se observou diferenças na morfologia e nem no tamanho dos cristalitos conforme os horizontes lateríticos e a cobertura.

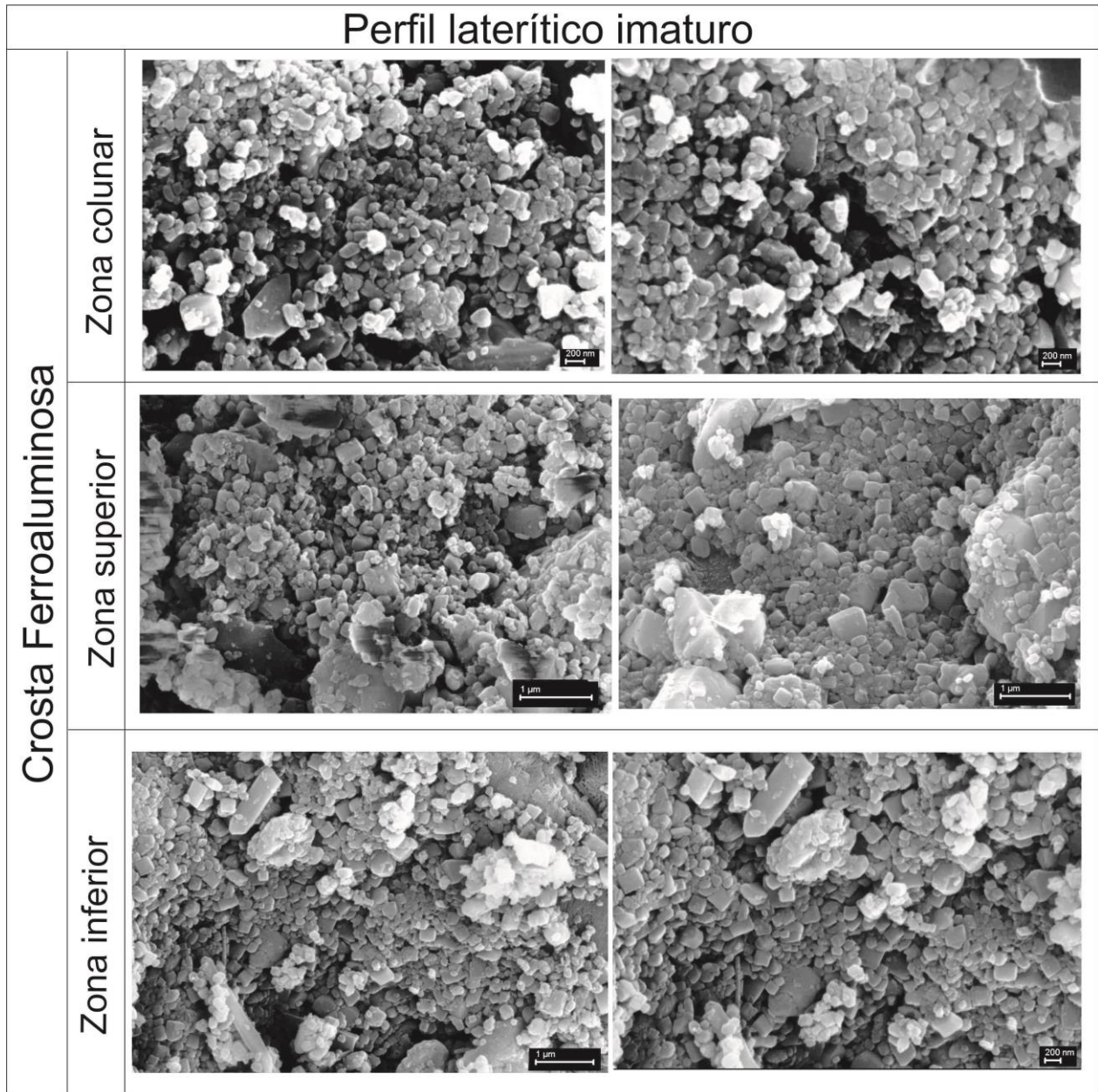
Análises químicas semiquantitativas (MEV/EDS) em domínio de cristalitos de anatásio mostram o domínio de Ti (44,0 % até 58,4 %) seguido por Si (1,4 % até 20,6 %), Fe (3,2 % a 7,2%) e Al (0,9 % até 1,1 %) confirmando o domínio de anatásio nos resíduos obtidos, e por conseguinte dele como mineral de Ti no perfil imaturo e cobertura argilosa (tabela 3).

Tabela 3 – Composição química elementar em porcentagem para cristais de anatásio. CFPD – Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada; HES – Horizonte Esferolítico a nodular; CAR – Cobertura de argila; ZNI – Zona nodular inferior; ZNS – Zona nodular superior; ZC – Zona colunar.

Elementos	CFPD ZNI	CFPD ZNS	CFPD ZC	HES	CAR
Ti	44,0	53,4	50,1	58,4	55,4
Fe	3,2	7,2	-	3,7	-
Al	0,94	1,1	1,0	0,9	1,1
Si	20,6	1,4	2,4	4,8	5,9
O	33,6	37,0	42,7	32,3	37,6

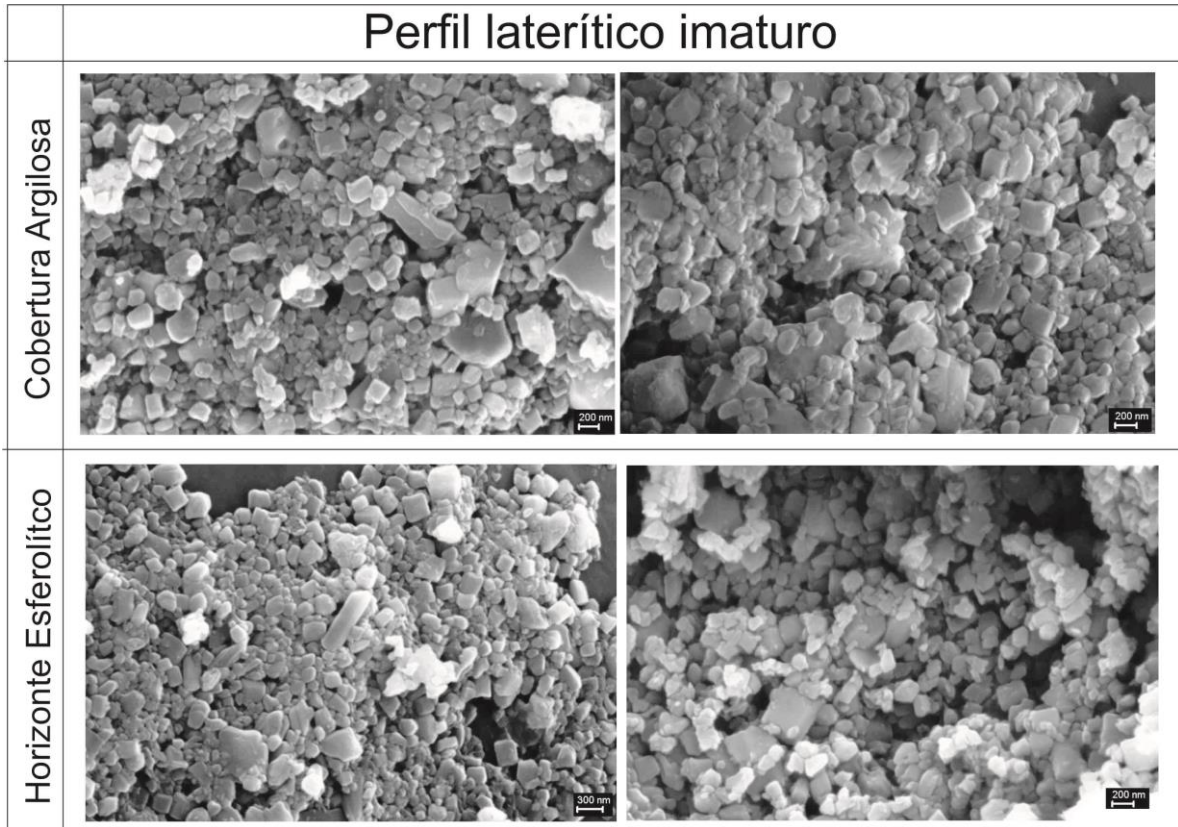
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Imagens de MEV mostrando aglomerados de cristaltos de anatásio presentes no perfil laterítico imaturo da BR-222, km 137 (Crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Imagens de MEV mostrando aglomerados cristalitos de anatásio presentes no perfil laterítico imaturo do km 137 (Horizonte esferolítico e cobertura argilosa).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4. MINERAIS PESADOS

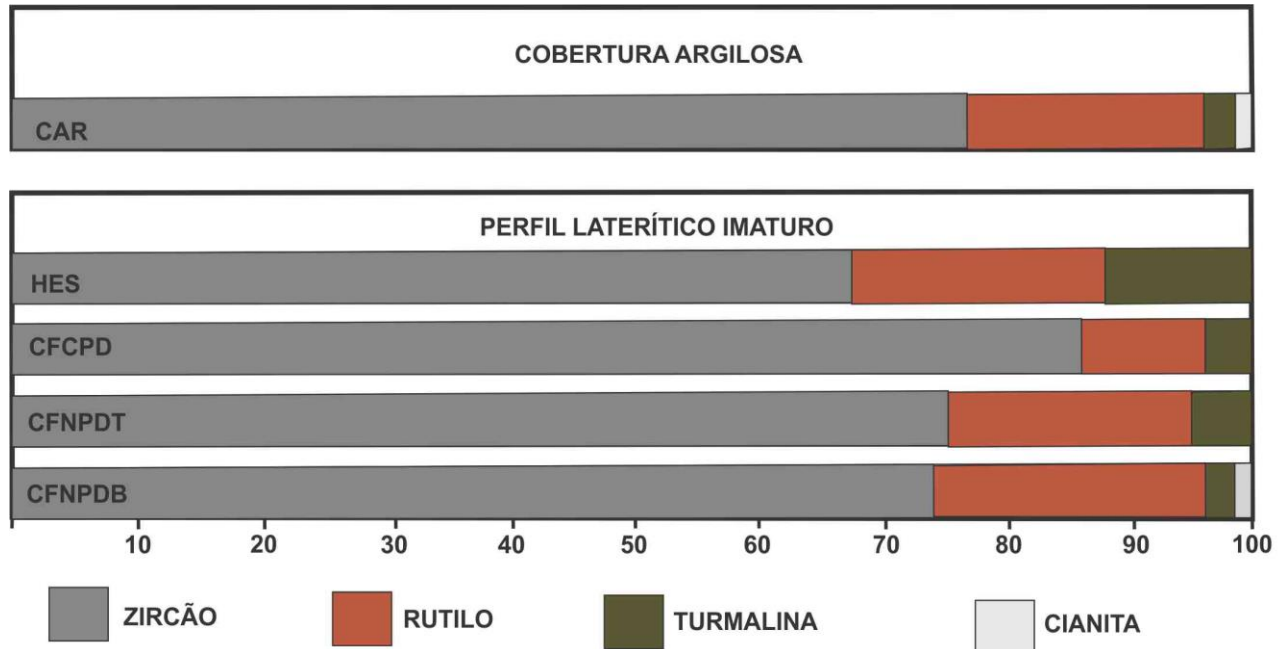
Os principais minerais pesados transparentes identificados foram zircão, rutilo, turmalina, cianita e estauroлита (Figura 25), refletindo, de fato, um intenso intemperismo com o domínio destes minerais ultraestáveis no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa. O zircão é o mineral mais abundante nos horizontes, seguido por rutilo e turmalina (figura 26). Cianita e estauroлита ocorrem esporadicamente, este último, restrito a porção inferior do perfil imaturo. Entre os minerais em grãos opacos no perfil, principalmente na fração grossa (0,125 a 0,250 mm), por destacam-se hematita e magnetita, com ampla variedade de formas e texturas superficiais.

Figura 25 – Fotomicrografias de minerais pesados em luz natural identificados no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa da BR-222, km 137. Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Base (CFNPDB), Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta Ferroaluminosa Colunar Parcialmente Desmantelada (CFCPD), Horizonte Esferolítico a Nodular (HES) e Cobertura Argilosa (CAR).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Distribuição composicional comparativa dos minerais pesados do perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa. Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Base (CFNPDB), Crosta Ferroaluminosa Nodular Parcialmente Desmantelada Topo (CFNPDT), Crosta Ferroaluminosa Colunar Parcialmente Desmantelada (CFCPD), Horizonte Esferolítico a Nodular (HES) e Cobertura Argilosa (CAR).



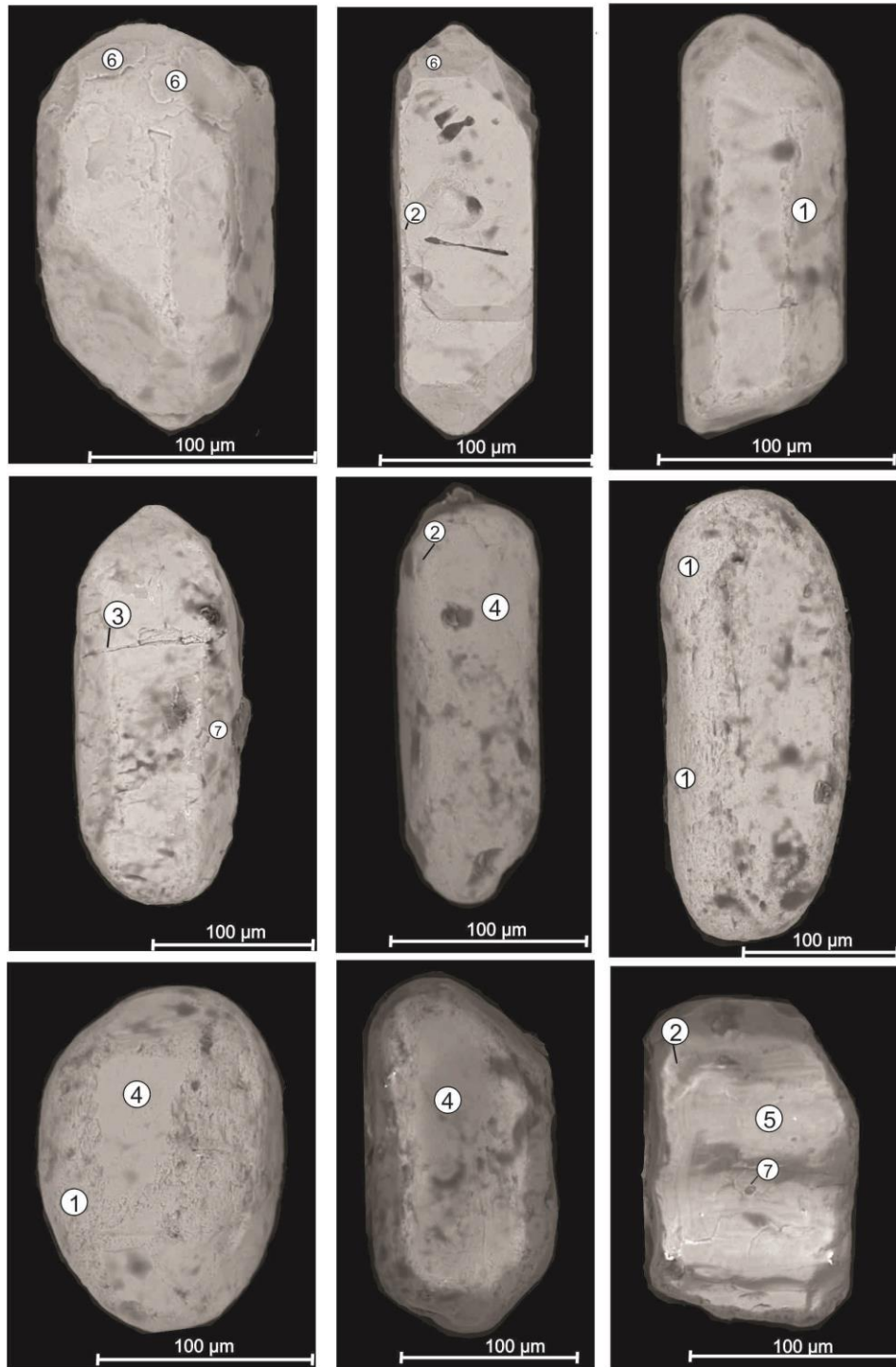
4.4.1. Zircão

O zircão o mineral mais abundante e varia entre 67% a 83%, sendo mais abundante na matriz da zona colunar da crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada e na cobertura.

O zircão é principalmente incolor, mas se apresenta ainda em castanho, amarelado e rosado. Os seus grãos são subarredondadas a arredondadas, com cristais em menor proporção, prismáticos, euédricos a subédricos, raramente com cristais bipiramidais. De modo geral, os cristais prismáticos se encontram com as arestas arredondadas. Inclusões de minerais opacos e inclusões em forma de bolha e agulha são frequentes nos diferentes zircões estudados.

A superfície dos grãos e cristais revelam modificações mecânicas resultantes de transporte e abrasão: bordas de abrasão, fraturas conchoidais, fraturas paralelas, superfície recente, superfície polida, placas soerguidas/deslocadas e cavidades circulares (figura 27).

Figura 27 – Classificação das texturas superficiais mais frequentes encontradas nos grãos de zircão sob imagens de MEV. 1- bordas de erosão; 2- fraturas conchoidais; 3- fraturas paralelas; 4 – superfície fresca; 6-placas soerguidas/deslocadas; 7- cavidades circulares.

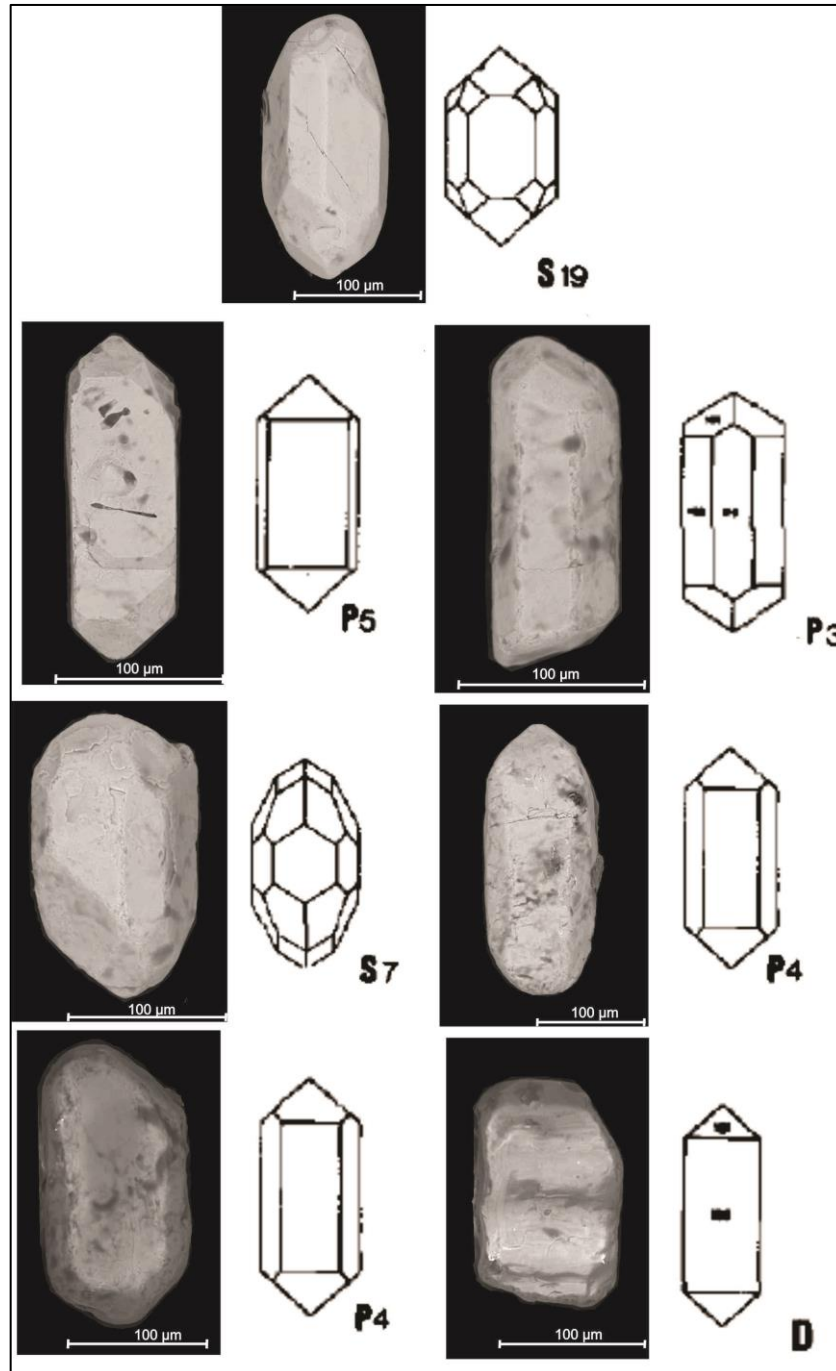


Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo tipológico de cristais de zircão comparado ao diagrama de Pupin (1980) tem sido muito utilizado como indicador de proveniência. Segundo Pupin (1980) as morfologias dos zircões estão relacionadas aos fatores como: temperatura de cristalização e composição química do magma e de voláteis, principalmente a água. A temperatura é considerada responsável pelo desenvolvimento das faces dos prismas, enquanto que, o desenvolvimento das formas piramidais está relacionado a composição química do magma. Com isto, ele desenvolveu uma classificação genética a partir do relativo desenvolvimento das faces prismáticas e, propôs 64 tipos de zircões, genericamente denominados por letras que representam informações das características petrogenéticas do magma fonte.

A avaliação morfológica com base em Pupin (1980), aplicada aos cristais que apresentavam ao menos uma face distinguível proporcionou a identificação dos tipos P, S e D nas amostras do perfil imaturo e cobertura argilosa (figura 28). O tipo 'P' é o mais abundante, e é típico de magmas fontes de granitos alcalinos. O segundo mais frequente é o tipo 'S', considerado como típico de granitos com fonte de magmas cálcico-alcalinos. E o 'D' é o menos comum, e assim como o P, indica granitos com fonte de magmas alcalinos.

Figura 28- Imagens de MEV das principais formas dos tipos de zircões presentes no perfil laterítico imaturo e cobertura de argila de acordo com Pupin, 1980.



Fonte: Elaborado pelo autor

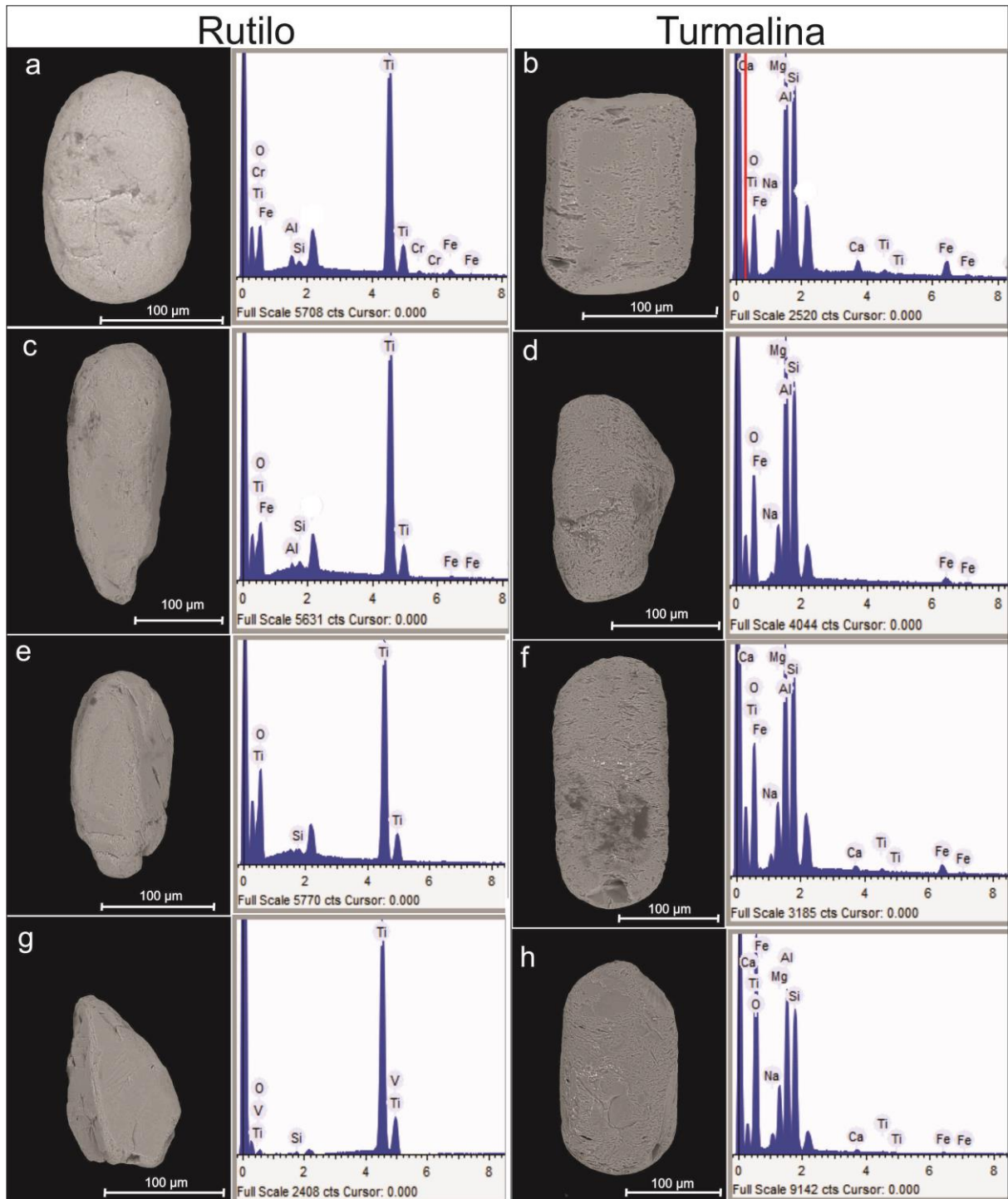
4.4.2. Rutilo

O rutilo varia de 13 a 23 % e se apresenta principalmente sob a forma prismática subédrica, mas também ocorrem grãos irregulares, arredondados a subarredondados. A cor é principalmente vermelha, sendo que os grãos irregulares são geralmente amarronzados. Em detalhe (figura 29 a, c, e, g) observa-se microfraturas e marcas de abrasão.

4.4.3. Turmalina

A turmalina geralmente ocorre como grãos preservando a morfologia prismática, porém já arredondado a bem arredondado, sendo raros os cristais originais euédricos e subédricos. Esses grãos ou cristais são preferencialmente marrons ou verdes amarronzados. Fragmentos irregulares, angulosos a subangulosos também foram observados com frequência. Evidências de desgaste como ranhuras e fraturas conchoidais são comuns em suas bordas (figura 29 b, d, f h). Sua abundância entre os minerais pesados no perfil laterítico imaturo e cobertura varia entre 2 e 13 %, sendo mais abundante na matriz do horizonte nodular a esferolítico.

Figura 29 - Imagens de MEV com espectros de EDS mostrando formas e texturas superficiais de rutilo e turmalina no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa: no rutilo em (a), (c), (e) e (g) formas prismáticas subédricas, e as texturas superficiais de abrasão e microfaturas; na turmalina em (b), (d) e (f) marcas de ranhura e em (f) fratura conchoidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.4. Outros Minerais Pesados

Além dos minerais pesados descritos anteriormente ocorrem ainda com menor frequência: cianita (1%), que é incolor e se apresenta como grãos irregulares ou exibindo deformações, raramente se observa cristais com seu hábito prismático tabular característico; estaurolita (<1 %) é de cor amarelo pálido ou intenso, com grãos irregulares subangulosos a subarredondados, e está restrita a porção inferior do perfil laterítico imaturo. Exibe microfraturas e inclusões de minerais opacos.

5. CONCLUSÃO

O perfil investigado compreende três horizontes de alteração intempérica. Na base está a crosta ferroaluminosa parcialmente desmantelada, que no seu topo apresenta uma zona colunar individualizada, e de modo geral é microporosa, cavernosa e apresenta nódulos ferruginosos de óxi-hidróxidos de ferro; o horizonte esferolítico a nodular sobreposto é representado por esferólitos de coloração marrom avermelhado escuro, envolvidos por matriz argilosa; a cobertura argilosa no topo é representada por um material silto-argiloso amarelo, homogêneo tido como latossolo. A mineralogia geral do perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa é representada por hematita, goethita, caulinita, quartzo e como acessórios anatásio e minerais pesados (zircão, rutilo, turmalina, cianita e estauroлита). No entanto estes divergem em conteúdo, que oscilam segundo litologia e mesmo os horizontes. A composição química reforça os dados mineralógicos, confirmando o domínio de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 . A concentração dos elementos traços são variáveis relativos a média crustal, sendo Zr, V, Cr, Th, Ga, As e Hf os mais significativos e acima da média crustal. Quando normalizados aos condritos exibem forte anomalia negativa de Eu e ligeira negativa de Ce, com tendência a enriquecimentos dos ETRP. Algumas correlações entre os elementos traços são muito significativas. Zr-Hf é linear muito significativa e reforça a presença de zircões com similar razão Zr/Hf em todo o perfil e cobertura, da mesma forma Nb/Ta, sugerindo o mesmo mineral e fonte comum e as correlações positivas Zr – ETR e TiO_2 – ETR permitem prevê que os ETR estejam relacionados ao zircão e em parte ao anatásio. A extração de anatásio por método químico foi bem sucedida no perfil laterítico imaturo e cobertura argilosa de Abel-Figueiredo, e o anatásio se apresenta como cristais nanométricos de até 400 nm, não se observando diferenças na morfologia e nem no tamanho dos cristalitos nos horizontes lateríticos e a cobertura. Os minerais pesados são representados por zircão, rutilo, turmalina, cianita e estauroлита. O zircão é o mineral mais abundante em todas as amostras (67% a 83%), seguido por rutilo (13 a 23%), turmalina (2 e 13 %), cianita (1%) e estauroлита (<1%), sendo que este último se restringe a porção inferior do perfil imaturo. Portanto, a composição mineralógica e a distribuição dos teores dos componentes químicos principais e assembléia de

minerais pesados (mostram domínio de minerais ultraestáveis) são compatíveis com a evolução laterítica, equivalente aos perfis lateríticos mais bem distribuídos na Amazônia, conhecidos como imaturos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, D. S.; COSTA, M. L. Aspectos texturais e mineralógicos de crostas ferruginosas de perfil laterítico imaturo em Rondon do Pará. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 14., 2015, Marabá. **Resumos Expandidos**. Belém: SBG, 2015.
- ANAISSE JR J.; TRUCKENBRODT W.; ROSSETTI D.F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açailândia/MA, Bacia do Grajaú. *In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O Cretáceo na bacia de São Luís-Grajaú*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. 150 p.
- BOULANGÉ, B.; CARVALHO, A. The bauxite of Porto de Trombetas. *In: CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.J.; LUCAS, Y. (Ed.). Brazilian bauxites*. São Paulo: USP/FAPESP/ORSTOM, 1997. p. 107–133.
- BUCHANAN, F. **A journey from Mandras through the countries of Mysore, Kanara and Malabar**. London: East India Company, 1807. v 2. p. 436-461, 559.
- COSTA, J. B. S.; BERMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; B, M. S.; JÚNIOR, C. R. P. F.; BEZERRA, P. E. L.; COSTA, M. L.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica da região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**. v. 4, n. 2, p. 23-44. 1996.
- COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 2, p. 146-160. 1991.
- _____. **Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização**. [S.l.: s.n.], 2007.
- _____. Lateritisation as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. **Explor. Min. Geol.**, London, v. 6, n. 1, p. 79–104. 1997.
- COSTA, M.L.; PÖLLMANN, H.; FIGUEIRA, B.; KADEN, R.; GÖSKE, J. Nanoanatase as accessory mineral of clay cover from lateritic profile. *In: GENERAL MEETING OF THE INTERNATIONAL MINERALOGICAL ASSOCIATION*, 21., 2014, Gauteng, South Africa. **Resumo Simples**. Gauteng: [s.n.], 2014b.
- COSTA, M.L.; SILVA CRUZ, G.; FARIA, H. F. A.; PÖLLMANN, H. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationships. **Journal of Geochemical Exploration**. v. 146, p. 58-74. 2014a.
- DELVIGNE, J. E. **Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering**. Paris: Mineralogical Association of Canada, ORSTOM, 1999.
- EVENSEN, N.M.; HAMILTON, P.J.; O'NIONS, R.K. Rare earth abundances in chondritic meteoritic. **Geochemical Cosmochimica Acta**, v. 42, p. 1199-1212, 1978.

GÓES A.M. **Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecurú, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão.** 1981. 55 p. Dissertação (mestrado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1981.

GÓES, A.M.; ROSETTI, D.F. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. *In*: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú.** Belém: [s.n.], 2001. p. 15-29.

HORBE A.M.C.; COSTA M.L. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas sílico-ferruginosas. **Acta Amazônica**, v. 27, p. 241-256, 1997.

HORBE A.M.C.; COSTA M.L. Relações genéticas entre latossolos e crostas lateríticas luminosas e alumino-ferruginosas na região de Paragominas, Pará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n.4, p. 497-504. 1999.

KOTSCHOUBEY B.; TRUCKENBRODT W.; HIERONYMUS B. Bauxite deposits of Paragominas. *In*: A. CARVALHO, B.; BOULANGÉ, A.J.; MELFI; LUCAS, Y. (Ed.). **Brazilian bauxites.** São Paulo: USP/FAPESP/ORSTOM, 1997. p. 75-106.

KOTSCHOUBEY, B; CALAF, J.M.C; LOBATO, A.C.C; LEITE, A.S; AZEVEDO, C.H.D. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera da Região de Paragominas, noroeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. *In*: MARINI, O.J. **Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia.** Brasília, DF : DNPM : ADIMB, 2005. p. 687-782.

LIMA, R. D.; ROSETTI D. F. Análise faciológica e sequencial de depósitos de delta de baía (Neocretáceo), Leste da Bacia do Grajaú, MA. *In*: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. **O Cretáceo na bacia de São Luís-Grajaú.** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 151-174.

MANGE M.A.; MAURER H.F.W. **Heavy mineral in colour.** [S.l.]: Chapman & Hall, 1992. p. 147.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner**, v. 7, p. 317-327, 1960.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites: **Nature**, v. 299, p. 715 – 717, 1982.

PANTOJA H.M. **Mineralogia, geoquímica e minerais pesados do perfil laterito-bauxítico com cobertura e sua relação com o Grupo Itapecuru:** lavra piloto Ciríaco (Rondon do Pará). 2015. 71f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. *In*: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú.** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p.77-100.

PUPIN J.P. Zircon and granite petrology. **Contribution to mineralogy and petrology**, Berlin /Heidelberg, v. 73, n. 3, p. 207 – 220, jul. 1980.

ROSSETTI, D. F. Facies analysis of the Lower Succession of the Upper Itapecuru Formation, São Luís Basin, northern Brazil. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. (Ed.). **Contribuições à Geologia da Amazônia**. Belém: Falangola, 1997. p.241-284.

ROSSETTI D.F.; GÓES A.M. Caracterização paleoambiental de depósitos albianos na borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: modelo de delta fluvial influenciado por tempestade. **Rev. Bras. Geociências**, v.33, n. 3, p. 299-312. 2003.

ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. Geologia. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Neógeno na Amazônia Oriental** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2004. p. 13-52. (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; ARAI, M. A passagem Aptiano-Albiano na Bacia do Grajaú. In: ROSSETTI, D.F.; GOES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p. 101-117. (Coleção Friedrich Katzer).

SANTOS JR. A. E.; ROSSETTI D. F. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do rio Capim, leste da sub-bacia de Cametá. **Rev. Bras. Geoc.**, v. 33, p. 313-324. 2003.

SAYIN, M.; JACKSON, M. L. Anatase and Rutile determination in kaolinite deposits. **Clays and Clay Minerals**, v. 23, p. 437-443. 1975.

TAYLOR, S.R.; MCLENNAN, S. M. **The continental crust: its composition and evolution**. Blackmell: Oxford. 1985.

TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B.; HIERONYMUS, B. Aluminization: an important process in the evolution of Amazonian bauxites. **Travaux. ICSOBA**, Zagreb, v. 22, n. 1, p. 27–42, 1995.

VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. (Org.). **Geologia e recursos minerais do estado do Pará**: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. Belém: CPRM, 2008. Escala 1:1.000.000.