



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC**

**AS CROSTAS LATERÍTICAS DO DOMÍNIO CANAÃ,  
REGIÃO DE CARAJÁS (PA): MICROMORFOLOGIA,  
MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:**

**ELAINE DE OLIVEIRA MENEZES**

**Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (IG/UFPA)**

---

**BELÉM – PA**

**2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**AS CROSTAS LATERÍTIICAS DO DOMÍNIO CANAÃ, REGIÃO DE  
CARAJÁS (PA): MICROMORFOLOGIA, MINERALOGIA E  
GEOQUÍMICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:**

**ELAINE DE OLIVEIRA MENEZES**

**Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (IG/UFPA)**

---

**BELÉM – PA**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistema de Bibliotecas da  
Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M541c Menezes, Elaine de Oliveira, 1993-

As crostas lateríticas do Domínio Canaã, região de Carajás (PA):  
micromorfologia, mineralogia e geoquímica / Elaine de Oliveira Menezes. -  
2017.

xv, 47 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Geologia,  
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.  
Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa.

1. Mineralogia. 2. Micromorfologia. 3. Geoquímica. 4. Crosta laterítica  
ferruginosa. 5. Canaã dos Carajás. I. Costa, Marcondes Lima da, *orient.* II.  
Título.

CDD 22 ed.: 549.098115

---

Elaborada por  
Lucia de Fátima Imbiriba de Sousa  
CRB-2/652



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**AS CROSTAS LATERÍTICAS DO DOMÍNIO CANAÃ, REGIÃO DE  
CARAJÁS (PA): MICROMORFOLOGIA, MINERALOGIA E  
GEOQUÍMICA**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por:**

**ELAINE DE OLIVEIRA MENEZES**

**Como requisito para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia**

Data da Aprovação: / /2017

Banca Examinadora:

---

Prof. Marcondes Lima da Costa – Orientador  
(Pós-Dr. em Mineralogia e Geoquímica – UFPA)

---

Prof. Davis Carvalho – Membro  
(Dr. em Geologia e Geoquímica – UFPA)

---

Geólogo Pablio dos Santos – Membro  
(MSc em Geoquímica e Petrologia – UFPA)

Aos meus avós-pais.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e aos meus protetores que sempre me guiam e me dão forças em fases decisivas;

Ao professor Dr. Marcondes Lima da Costa pelas oportunidades de aprendizado e correções;

À Socorro Progene pelas valiosas sugestões ao longo do início deste trabalho;

Ao geólogo Dr. Mário Ivan pelo incentivo e pelas conversas sobre a geologia;

Ao geólogo MSc. Clóvis Maurity pelas sugestões e correções;

Aos técnicos e responsáveis pelos laboratórios do Instituto de Geociências (IG-UFPA), especialmente: Rose e seu Natalino (Laboratório de Análises Químicas), seu Lopes (Laboratório de Preparação de Amostras); Joelma Lobo (Laboratório de Laminação); Gisele Marques e Bruno Portugal (Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura);

Aos integrantes do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA) pelas sugestões;

Aos amigos pelas conversas e descontrações durante os mais diversos momentos, especialmente: Ana Paula Martins, Lucas Condurú, Marcelo Albuquerque, Rayara Silva, Rebeca Castanho;

À Cristal pelo companheirismo e por estar ao meu lado a cada segundo dedicado neste trabalho;

À minha família, em especial aos meus avós, Maria de Fátima e João Fernandes (*in memoriam*), pela confiança e pelo investimento incondicional.

*“Tu escolhes, recolhes, eleges, atrais, buscas, expulsas, modificas tudo aquilo que te rodeia a existência. Teus pensamentos e vontades são a chave de teus atos e atitudes... São as fontes de atração e repulsão na tua jornada vivência.”*

- Chico Xavier

## RESUMO

As crostas lateríticas estão bem distribuídas na Amazônia e grande parte de seus minérios são resultantes do processo de lateritização. No Domínio Canaã, região de Carajás, as formações lateríticas estão bem representadas em terrenos rebaixados. Em virtude da importância paleoambiental, iniciou-se este projeto de pesquisa para avaliar como as mudanças paleoclimáticas influenciaram esta área e seu entorno. As amostras de crostas ferruginosas foram coletadas, descritas, fotografadas, preparadas e submetidas a análises por microscopia ótica e eletrônica, DRX, FTIR, análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria (TGA) e análises químicas com o objetivo de caracterizar os aspectos mesoscópicos, microscópicos, mineralógicos e químicos. As crostas são maciças a pouco porosas, e porosas, raramente nodulares, de cor marrom avermelhada a ocre. A hematita, goethita e caulinita são os minerais principais. Ao microscópio óptico a trama compreende plasma criptocristalino hematítico, goethítico e caulínítico que cimentam nódulos, pisólitos e, por vezes, grãos de quartzo fraturados e/ou corroídos. Na maioria das vezes, ocorrem poros de dissolução de grãos de quartzo. As análises químicas confirmam o domínio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . A análise de elementos maiores e menores, elementos-traço e terras raras permitiram identificar crostas derivadas de rochas ácidas, com predomínio de aluminossilicatos, e de rochas intermediárias a básicas. A composição mineralógica e química é compatível à evolução de perfis lateríticos imaturos da Amazônia, formados durante um clima úmido e quente, com alternância entre períodos semiáridos e cobertura de savana no Pleistoceno.

Palavras-chave: Micromorfologia. Mineralogia. Geoquímica. Crosta laterítica ferruginosa. Canaã dos Carajás.

## ABSTRACT

The lateritic iron crusts are well distributed in Amazon and its majority ores results of laterization processes. In Canaã domain of the Carajás Province, lateritic formations are very common in lowered lands. Therefore paleoenvironmental importance, this research aims to evaluate how paleoclimatic changes influenced this area and its surroundings. Samples of iron crusts were collected, described, photographed, prepared and submitted to mineralogical analysis by optical and electronic, XRD, FTIR, differential thermal analysis (DTA) and thermogravimetry (TGA) and chemical analysis aiming to characterize the mesoscopic, microscopic, mineralogical and chemical. The crusts are massive to slightly porous, and porous, rarely nodular, reddish-brown to ochre. Hematite, goethite and kaolinite are main minerals. Through the optical microscopy, the general aspect comprises cryptocrystalline plasma hematitic, goethitic and kaolinitic which cements nodules, pisolites and, sometimes, fractured and/or corroded quartz grains. Mostly occur dissolution pores quartz grains. Chemical analysis confirms  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  domains. Analysis of major and minor elements, trace elements and rare earths allowed to identify crusts derived from acidic rocks, with more aluminosilicates, and intermediate to basic rocks. The mineralogical and chemical composition is compatible with the Amazon immature lateritic profiles, formed during humid and hot climate, with alternation between semiarid periods and savannah coverage in Pleistocene.

**Keywords:** Micromorphology. Mineralogy. Geochemistry. Lateritic iron crust. Canaã dos Carajás.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização. As 13 (treze) amostras estudadas estão identificadas no mapa.....4
- Figura 2- Mapa geológico da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas. Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* (2008), escala 1:1.000.000.....9
- Figura 3- Mapa de unidades de relevo da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas. Fonte: Modificado de IBGE (2006), escala 1:5.000.000.....11
- Figura 4- Imagem SRTM (banda SIR-C 90 m) com a localização das amostras coletadas e investigadas. Fonte: Modificado de USGS (2017).....12
- Figura 5- Mapa esquemático de solos da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas. Fonte: Modificado de IBGE (2008), escala 1:1.800.000.....14
- Figura 6- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. Nas amostras de crostas lateríticas ferruginosas (A) ITVL 02, (B) ITVL 07, (C) ITVL 08 e (D) ITVL 09 nota-se cavidades arredondadas a angulosas. Em (A) é possível observar cavidade preenchida por material terroso, vide indicação por seta.....15
- Figura 7- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 12B: crosta porosa; (B) ITVL 13B(2): crosta predominantemente maciça, com a presença de raras cavidades; (C) ITVL 16(1): crosta em que se observam cavidades alongadas, além de porções escuras, provavelmente devido à presença de manganês; (D) ITVL 20A: crosta ferruginosa com cavidades canalizadas e goethitizadas; (E) ITVL 22B: crosta porosa friável constituída por material argiloso de cor creme a esbranquiçada, provavelmente devido à presença de caulinita.....16
- Figura 8- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 04B(2) e (C) ITVL 05: crostas ferruginosas que apresentam fragmentos de quartzo em sua porção superior; (B) ITVL 15D: crosta ferruginosa com feições arredondadas em sua porção superior; (D) ITVL 21: crosta ferruginosa maciça a pouco porosa.....17

- Figura 9- Fotomicrografias de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 04B(2) e (B) ITVL 07: nódulos porosos cimentados por plasma ferruginoso, representado em (C) ITVL 08; (D) ITVL 09 e (H) ITVL 21: respectivos pisólito e nódulo digeridos, parcialmente, pelo plasma; (E) ITVL 15D e (F) ITVL 16(1): poros de dissolução e resquícios de quartzo fraturados e/ou corroídos, cimentados por plasma de oxi-hidróxido de ferro; (G) ITVL 20A: nódulos e contato (indicado por linha tracejada) entre plasma goethítico e hematítico. Nicóis //.....18
- Figura 10- Difractogramas de raios-X de crostas lateríticas, em que se identificam caulinita (Kln), goethita (Gt), quartzo (Qtz) e hematita (Hem); e espectros de absorção no infravermelho com indicação dos grupos funcionais e valores das bandas de estiramento.....20
- Figura 11- Difractogramas de raios-X de crostas lateríticas, em que se identificam caulinita (Kln), goethita (Gt) e hematita (Hem); e espectros de absorção no infravermelho de crostas lateríticas ITVL 04B(2), ITVL 05 e ITVL 21 com indicação dos grupos funcionais e valores de bandas de estiramento.....21
- Figura 12- Difractogramas de raios-X de crosta laterítica ITVL 15D, em que se identificam hematita (Hem) e caulinita (Kln); e espectros de absorção no infravermelho de crosta laterítica ITVL 15D com indicação dos grupos funcionais e valores de bandas de estiramento.....22
- Figura 13- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 02: feições côncavas observadas em matriz. Agregados subédricos em (B) ITVL 04B(2) de oxi-hidróxido de ferro. (C) ITVL 07: formação de nanoplacas de goethita ( $\alpha$ -FeOOH), associada à caulinita. (D) ITVL 07: cristalitos formando feições botrioidais de goethita. Agregados placosos em (E) e (F), amostra ITVL 12B, de oxi-hidróxido de ferro. Abaixo está indicada a imagem por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho.....23

- Figura 14- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 12B: aglomerados de cristalitos de oxi-hidróxido de ferro e, em maior escala, (B) nota-se estes em forma de rosetas. (C) ITVL 15D: lamelas de oxi-hidróxido de ferro e, em (D), estas feições são observadas em detalhe. Abaixo está a imagem por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho. (E) ITVL 05: agregados de oxi-hidróxido de ferro e, ao lado, sua imagem por EDS, em que ocorre um pequeno pico de Cr.....24
- Figura 15- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 16(1): cristalitos de caulinita formando colunas. Imagem por EDS mostrada abaixo, indicando o domínio de alumínio. (B) ITVL 02 e (C) ITVL 12B: feições observadas em matriz ferruginosa. Abaixo está a imagem por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho, em que se observa dominância em Si.....26
- Figura 16- Termograma de alíquota de crosta com a presença de dois picos endotérmicos e ligeiro pico exotérmico.....27
- Figura 17- Distribuição de elementos maiores, com o predomínio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; e perda ao fogo de crostas lateríticas.....32
- Figura 18- Distribuição de elementos-traço de crostas lateríticas, expressos em ppm.....34
- Figura 19- Amostras de crostas plotadas em diagrama de dispersão de Ti x Zr de Hallberg para identificação de provável rocha ígnea fonte. As amostras representadas por círculos pretos mostram proveniência de rochas ácidas e as amostras representadas por círculos em vermelhos indicam rocha fonte intermediária à básica. Fonte: Adaptado de Hallberg (1984).....35
- Figura 20- Padrão de distribuição dos ETR's normalizados aos condritos, nas amostras de crostas lateríticas.....37
- Figura 21- Diagrama ternário que mostra a mobilidade de  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  durante a lateritização, observando-se dois domínios.....37
- Figura 22- Diagramas binários com suas respectivas retas de regressão linear e coeficiente y, que mostram a relação entre (I)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x  $\text{SiO}_2$ , (II)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (III)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  x  $\text{SiO}_2$  e (IV)  $\text{TiO}_2$  x  $\text{SiO}_2$ .....39

Figura 23- Diagramas binários com suas respectivas retas de regressão linear e coeficiente  $y$ , que mostram a relação entre (I)  $\text{TiO}_2 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$  (II)  $\text{TiO}_2 \times \text{Al}_2\text{O}_3$ , (III)  $\text{TiO}_2 \times \text{Zr}$  e (IV)  $\text{Hf} \times \text{Zr}$ .....40

**LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1- Composição química expressa em % peso (elementos maiores e menores) e ppm (elementos-traço); n.a.: não analisado. Os resultados indicam possível proveniência de rochas ácidas, enquanto que as amostras indicadas por \* representam amostras de crostas provenientes de rochas intermediárias a básicas.....28
- Tabela 2- Concentrações médias de elementos em % peso (elementos maiores e menores) e ppm (elementos-traço) das amostras de crostas lateríticas do Domínio Canaã comparadas à média crustal; n.a.: não analisado.....30
- Tabela 3- Composição química de rochas lateríticas derivadas, respectivamente, de granitos, basaltos e rocha ultramáfica, evidenciando sua possível correlação entre laterito e rocha fonte. Fonte: Modificado de Costa (2007).....31

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 LOCALIZAÇÃO.....	3
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	4
2.1 AMOSTRAGEM.....	4
2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	4
2.3 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	5
2.4 ANÁLISE MEV-EDS.....	5
2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	5
2.6 ANÁLISE POR INFRAVERMELHO (FTIR).....	6
2.7 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (DTA) E TERMOGRAVIMETRIA (TGA).....	6
2.8 ANÁLISES QUÍMICAS.....	6
<b>3 ASPECTOS GERAIS DE CANAÃ DOS CARAJÁS</b> .....	7
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	7
3.2 RELEVO.....	10
3.3 SOLO.....	13
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	15
4.1 CROSTA LATERÍTICA FERRUGINOSA.....	15
4.1.1 Aspectos texturais macroscópicos e microscópicos.....	15
4.1.2 Mineralogia por DRX e FTIR.....	19
4.1.3 Morfologia e química.....	22
4.1.4 Comportamento térmico.....	22
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	27

4.2.1 Elementos maiores e menores.....	31
4.2.2 Elementos-traço.....	33
4.2.3 Elementos terras raras.....	35
4.3 DIAGRAMAS BINÁRIOS E TERNÁRIOS.....	37
5 INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL.....	41
6 CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS .....	43

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

Os perfis lateríticos são produtos do intemperismo tropical e paleotropical e são encontrados no mundo inteiro, os mais novos na zona intertropical atual (Costa 1991, Freyssinet *et al.* 2005, Schellmann 1994). A Amazônia está situada na zona intertropical desde o Mesozoico (Tardy *et al.* 1991) e se apresenta como uma região rica em formações lateríticas tanto maduras como imaturas, muitas delas formadoras de importantes depósitos minerais, como bauxitas, ferro, níquel, manganês, ouro, fosfatos, entre outros (Costa 1991, Costa 2007, Kotschoubey *et al.* 2005a, Schellmann 1994).

O processo de lateritização no Brasil foi marcado por quatro eventos, com início em 60-70 Ma (Meso-Cenozoico) e retomada em 44-51 Ma (Eoceno), 34-37 Ma (Eoceno-Oligoceno) e 23-26 Ma (Oligoceno-Mioceno) (Costa 2007). Esta última fase consolidou-se no Pleistoceno e é considerada a responsável por atingir toda a Amazônia brasileira, com exceção do extremo sul (Costa 1991, Costa 2007, Kotschoubey *et al.* 2005a).

Os perfis lateríticos do Pleistoceno foram investigados por diversos autores devido à possibilidade de mapeamento, evolução geomorfológica e formação de depósitos minerais e, sobretudo, relevada importância ao conhecimento de condições paleoclimáticas (Costa 1991).

Perfis lateríticos são formados a partir de rocha-mãe, onde o horizonte argiloso (saprólito e mosqueado) evolui conforme a lateritização até o seu enriquecimento em ferro férrico ou alumínio (Schellmann 1994). Este aspecto possibilita, respectivamente, à formação dos perfis ferruginosos ou bauxíticos, que segundo Costa (1991) são os predominantes na região Amazônica.

Os perfis encontram-se subdivididos em horizontes distintos conforme o grau de diferenciação de textura, estrutura, química, mineralógica e isotópica e seus principais constituintes químicos são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e, subordinadamente,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , e o (Costa 2007, Kotschoubey *et al.* 2005b, Schellmann 1986, Schellmann 1994).

O horizonte de crostas ferruginosas ou ferroaluminosas lateríticas geralmente sustentam o relevo de regiões serranas, como as serras Norte e Sul de Carajás (Costa *et al.* 2005), e está associado a solos de cor amarelada a avermelhada derivados da erosão e intemperismo destas crostas (Costa 1991, Costa 1997, Tardy *et al.* 1991), registrando

prolongados períodos cíclicos e alternados de clima quente/úmido e seco (Costa 1991, Costa 1997).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A diversidade de perfis lateríticos e a variabilidade química entre os horizontes dificultam determinar uma composição química geral para estas formações, embora seja possível caracterizar o horizonte e identificar a provável rocha protólito (Costa 2007).

Estudos realizados por diversos autores permitiram caracterizar a química mineral de perfis lateríticos como aqueles constituídos por uma assembleia de minerais secundários e residuais (caulinita, hematita, goethita, gibbsita, anatásio, maghemita e boehmita), sob influências oxidantes de clima (tropical e paleotropical) e ambiente, que controlam a lixiviação de minerais primários terrosos, não terrosos, e mais solúveis (Anand & Paine 2002, Costa 2007, Kotschoubey *et al.* 2005a, Schellmann 1994).

De forma geral, quando comparados à rocha proveniente, os perfis lateríticos ferruginosos apresentam lixiviação de teores de  $\text{SiO}_2$ , elementos alcalinos e alcalinos terrosos, principalmente magnésio; enriquecimento em oxi-hidróxido de ferro férrico; aumento gradual de titânio na forma de anatásio ( $\text{TiO}_2$ ) (Costa 2007, Horbe & Costa 1999).

A associação de fatores climáticos e ambientais com a química mineral do horizonte laterítico, permite considerar as crostas como importantes registros geológicos para o entendimento paleoclimático e paleoambiental, a exemplo de Gutzmer & Beukes (1998) *apud* Costa (2007), que concluíram as condições de vegetação terrestre ocorrentes no Paleoproterozoico da atual África do Sul e Hill *et al.* (2000) *apud* Costa (2007), que identificaram ambiente tropical incompatível ao clima atual há 51 M.a em terrenos da Irlanda do Norte (Costa 2007).

Além disto, assim como na Província Hamersley, Austrália Ocidental e em Burkina Faso, na África; na região Amazônica foram registrados intensos períodos de intemperismo químico (Anand & Paine 2002, Costa 2007, Spier *et al.* 2006). Na Amazônia, as crostas lateríticas ferruginosas, em geral, estão sobrepostas por latossolos (latossolização) argilo-arenosos e areno-argilosos tipo Argila de Belterra e/ou cobertura sedimentar, o que demonstra

resposta ao clima predominantemente quente e úmido que se estabeleceu, além de rios densos e caudalosos e densa cobertura florestal (Costa 1991, Costa 2007).

Considerando a importância paleoambiental das formações lateríticas, principalmente nas reconstituições paleoclimáticas, iniciou-se no âmbito do Instituto Tecnológico Vale o projeto Paleoclima, visando avaliar as mudanças paleoclimáticas desta área e seu entorno, utilizando, além de outras ferramentas, as formações lateríticas. Dentro deste contexto, este trabalho descreve as crostas lateríticas aflorantes no município de Canaã, no sudeste do Pará.

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a caracterização dos aspectos texturais, mineralógicos e químicos das crostas lateríticas do município de Canaã (PA), Domínio Carajás.

### 1.4 LOCALIZAÇÃO

As amostras foram coletadas no município de Canaã, aproximadamente 18 km da sede municipal. A principal via de acesso aos pontos de amostragem deu-se por caminhos e algumas estradas pavimentadas, conforme indica a figura 1.

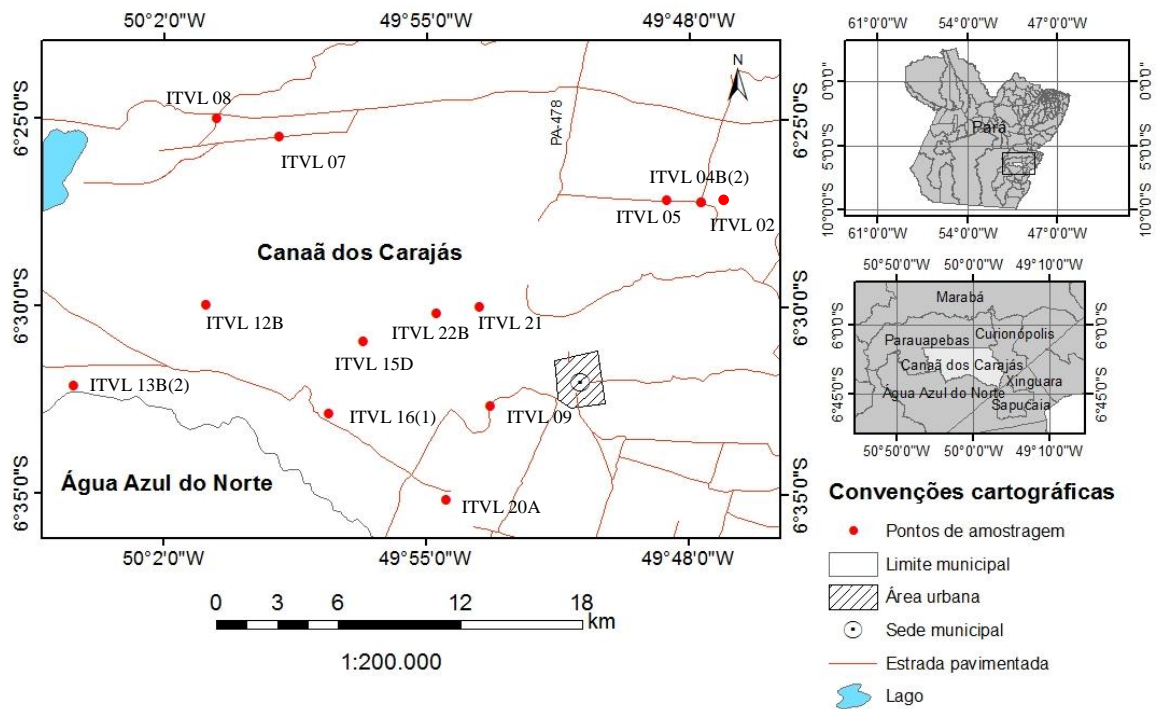


Figura 1- Mapa de localização. As 13 (treze) amostras estudadas estão identificadas no mapa, conforme localização.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 AMOSTRAGEM

Previamente foi realizado reconhecimento da extensão das ocorrências de crostas lateríticas nos terrenos baixos que margeiam a Serra dos Carajás em sua porção leste-sudeste, estendendo-se pelos municípios de Canaã, Xinguara e Rio Maria. Nesta oportunidade, amostras envolvendo crostas lateríticas e rochas primárias aflorantes foram coletadas pelos pesquisadores Marcondes Lima da Costa, Arnaldo Queiroz, Gilmara Regina Feio, Roberto Dall'Agnol e Tasso Guimarães.

### 2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras selecionadas foram organizadas, descritas, classificadas mesoscopicamente (com auxílio de lupa de bolso 14x) de acordo com aspectos texturais, de

estruturas e cor; todas acompanhadas por fotografias. Uma parte do material foi separada para a confecção de lâminas delgadas, enquanto que o restante foi pulverizado para análises mineralógicas e químicas.

### 2.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

As amostras *in natura* empregadas para a confecção de lâminas delgadas foram agregadas com resina Araldite da série 750e, endurecedor da série HY951. As análises de microscopia óptica foram realizadas pelo autor no Laboratório de Gemologia do Museu de Geociências do PPGG-IG-UFPA com auxílio de microscópio ZEISS, modelo AXIOLAB POL, com objetivas de aumento de 2,5x, 10x, 20x e 50x; acompanhadas por imagens capturadas com câmera digital *Canon*, modelo A460. Estes procedimentos foram utilizados para aprofundar as análises mineralógicas e micromorfológicas - descrições estas apoiadas pelo livro de Delvigne (1999) (*Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering*).

### 2.4 ANÁLISE MEV-EDS

No Laboratório de Microanálises do PPGG-IG-UFPA, foram efetuadas análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para se obter imagens de morfologias dos aspectos microcristalinos de amostras objeto de estudo.

### 2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

No Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada do Museu de Geociências do PPGG-IG-UFPA, foram realizadas análises de difração de raios-X também para a identificação de fases mineralógicas. Utilizou-se o método do pó e um difratômetro Bruker, modelo D2 Phaser, equipado com ânodo de cobre ( $\lambda_{Cu K\alpha} = 1.54184 \text{ \AA}$ ) em condições de funcionamento de 30 kV e 10 mA, detector do tipo *Lynxeye*. Os dados obtidos foram

interpretados com o auxílio do software X' Pert *High Score*, que compara os picos obtidos na análise com o banco de dados do *International Center on Diffraction Data (ICDD)*.

## 2.6 ANÁLISE POR INFRAVERMELHO (FTIR)

No Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações do Museu de Geociências do PPGG-IG-UFPA, empregou-se a técnica de análise de espectroscopia na região de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), por meio do equipamento BRUKER VERTEX-70, para auxílio na identificação de fases mineralógicas.

Os espectros foram obtidos a partir de pastilhas preparadas com cerca de 200mg de brometo de potássio, pulverizado e seco a 110°C e 0,0015 mg da amostra seca. As pastilhas foram submetidas à prensagem de 10 t/cm<sup>2</sup> em pastilhador de 14 mm de diâmetro. A preparação de pastilhas foi realizada em condições ideais para evitar a interferência da umidade do ar, sem ocasionar mudança na estrutura do material.

## 2.7 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (DTA) E TERMOGRAVIMETRIA (TGA)

O estudo do comportamento térmico das amostras foi acompanhado por análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria (TGA). Estes procedimentos foram efetuados no Laboratório de Caracterização Mineral do PPGG-IG-UFPA, em equipamento Shimadzu, modelo DTG-60AH. Utilizou-se a faixa de temperatura ambiente a 1100°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e fluxo de nitrogênio de 200 ml/min, em cadinho de alumina. A aquisição de dados dos registros e o tratamento destes deu-se por meio de *software* TA60, versão 2.21, Shimadzu.

## 2.8 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas de crostas foram realizadas no laboratório *Acme Analytical Laboratories Ltd.*, que analisou elementos maiores, menores, traços e terras raras. Os elementos maiores foram obtidos por Espectrômetro de Emissão em Plasma Indutivamente

Acoplado (ICP-ES) após fusão utilizando metaborato/tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico diluído. Os elementos-traço e terras raras foram determinados no Espectrômetro de Massa em Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), após fusão utilizando metaborato/tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico. No caso dos metais preciosos e base (Au, Ag, As, Bi, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn) a digestão foi por água régia. A perda ao fogo foi determinada por calcinação a 1000°C.

Os resultados foram tratados em *Excel* 2010. Os teores de elementos maiores, menores, traços e terras raras estão indicados em gráficos e foram interpretados com base em seu padrão de distribuição.

### 3 ASPECTOS GERAIS DE CANAÃ DOS CARAJÁS

#### 3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

O Cráton Amazônico está inserido predominantemente no Brasil, representado por plataformas pré-cambrianas e bacias sedimentares fanerozoicas, sendo uma das áreas de maior expressividade em terrenos arqueanos e proterozoicos (Coutinho 2008). A primeira proposta de compartimentação tectônica do Cráton Amazônico deu-se na década de 70 e, a partir da década de 90, o aperfeiçoamento de estudos geocronológicos possibilitaram novas interpretações e divisões (Coutinho 2008).

Modelos mais recentes, como o proposto por Santos *et al.* (2000), com base em datações por U-Pb em zircões, algumas por Rb-Sr, em associação a dados isotópicos Sm-Nd definiram sete províncias: Carajás-Imataca (3100-2530 Ma), Transamazônica (2250-2000 Ma), Tapajós-Parima (2100-1870 Ma), Amazônia Central (1880-1700 Ma), Rio Negro (1860-1520 Ma), Rondônia-Juruena (1760-1470 Ma) e Sunsás (1330-990 Ma); e o Cinturão de Cisalhamento K'Mudku (1100-1330 Ma).

A porção mineralizada da Província Carajás (Província Mineral de Carajás) compreende a porção crustal sudeste, a qual constitui a mais antiga e melhor representada, do Cráton Amazônico (Dall'Agnol *et al.* 2006, Fabre *et al.* 2011, Feio *et al.* 2013, João 2013). Ela compreende dois segmentos crustais: Domínio Rio Maria (Mesoarqueano), ao sul, e Domínio Carajás (Neoarqueano), ao norte (Dall'Agnol *et al.* 2006, Feio *et al.* 2013).

A área de estudo, Canaã dos Carajás, situa-se no Domínio Carajás e está entre a borda

sul da Bacia de Carajás e o subdomínio de transição, respectivamente ao norte e ao sul do Domínio Carajás (Feio *et al.* 2013).

O mapa geológico da figura 2 apresenta as principais unidades litoestratigráficas presentes na região, que é constituída por granitoides, pequenos plútons graníticos anorogênicos paleoproterozoicos (Corpo Granítico Rio Branco e similares), sobre os quais se encontram ocorrências de crostas lateríticas cenozoicas (Feio *et al.* 2013).

As crostas lateríticas identificadas na área do presente trabalho estão sobrepostas a unidades do embasamento arqueano (Fabre *et al.* 2011, Schwarz 2010, Sousa 2007), particularmente do Complexo Xingu. A relação de contato concordante também é descrita por Araújo (1991), ressaltando que as rochas deste complexo também são intrudidas por magmatismo do Meso-Proterozoico.

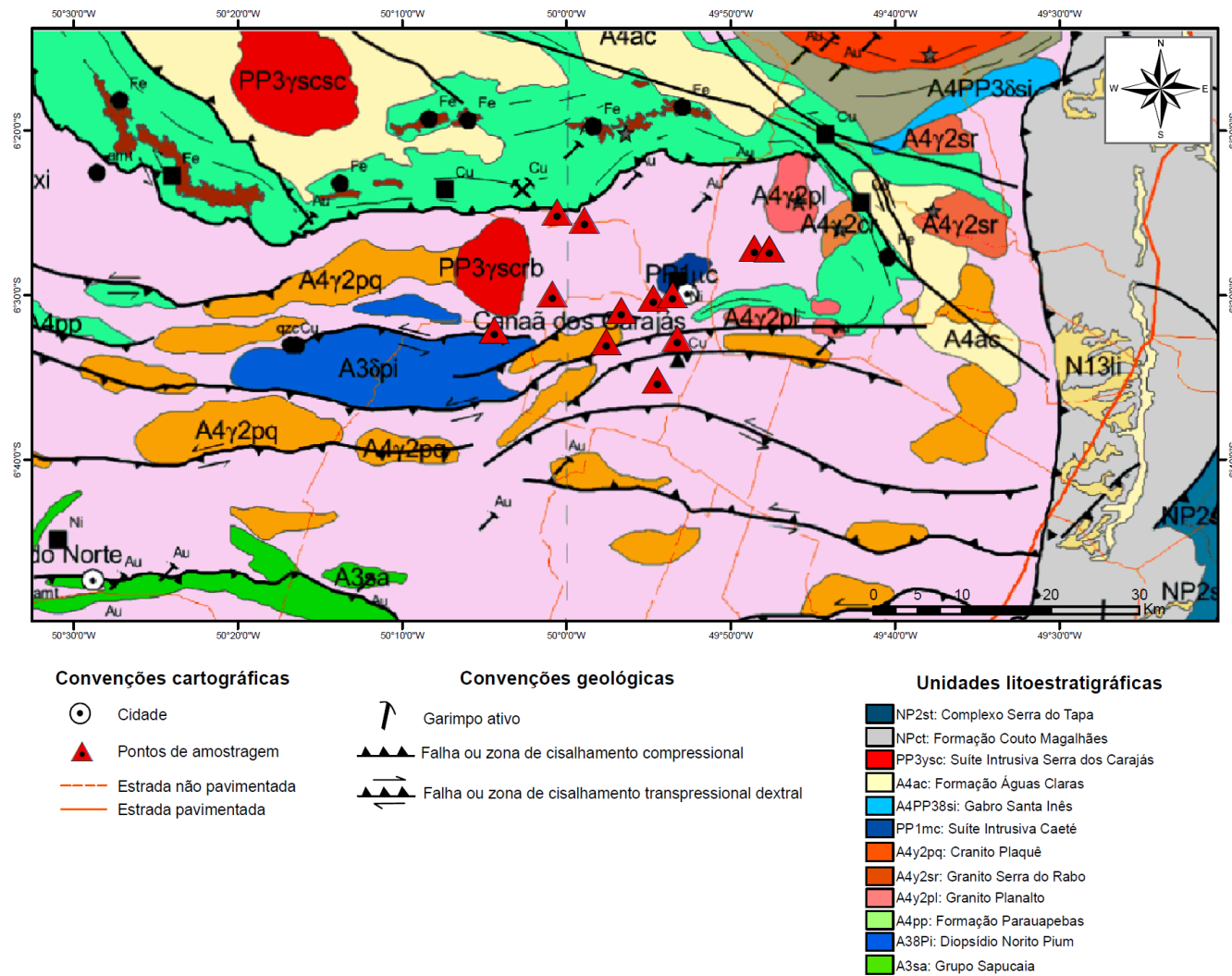


Figura 2- Mapa geológico da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas.  
 Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* (2008), escala 1:1.000.000.

### 3.2 RELEVO

Os lateritos imaturos estabeleceram-se no Pleistoceno e apresentam baixo grau de evolução e menor grau de complexidade de texturas, estruturas, feições químicas e mineralógicas quando comparados aos maduros (Costa 1991, Costa 2007, Tardy *et al.* 1991). Estão distribuídos por toda a região Amazônica e constituem o relevo jovem (Costa 1991).

A relação entre paisagem e lateritos imaturos é observada de forma que estes ocorrem em relevo de platô ou relevo ligeiramente ondulado, com equilíbrio nas velocidades de soerguimento tectônico e intemperismo tropical; sendo comum, durante o processo laterítico, a formação de superfícies mais dissecadas ou planas (Anand & Paine 2002, Costa 2007).

A região de estudo situa-se na unidade de relevo denominada depressão da Amazônia Meridional, conforme pode ser observado no mapa da figura 3. É caracterizada por um relevo pouco movimentado com médio a elevado grau de dissecação, que ocupam áreas com morrotes baixos de topos convexos que geralmente assumem formas de meia-laranjas (Bignelli *et al.* 1998). De forma complementar, a figura 4 mostra imagem SRTM em que se nota o domínio de altitude relativamente baixa, em torno de 164 metros.

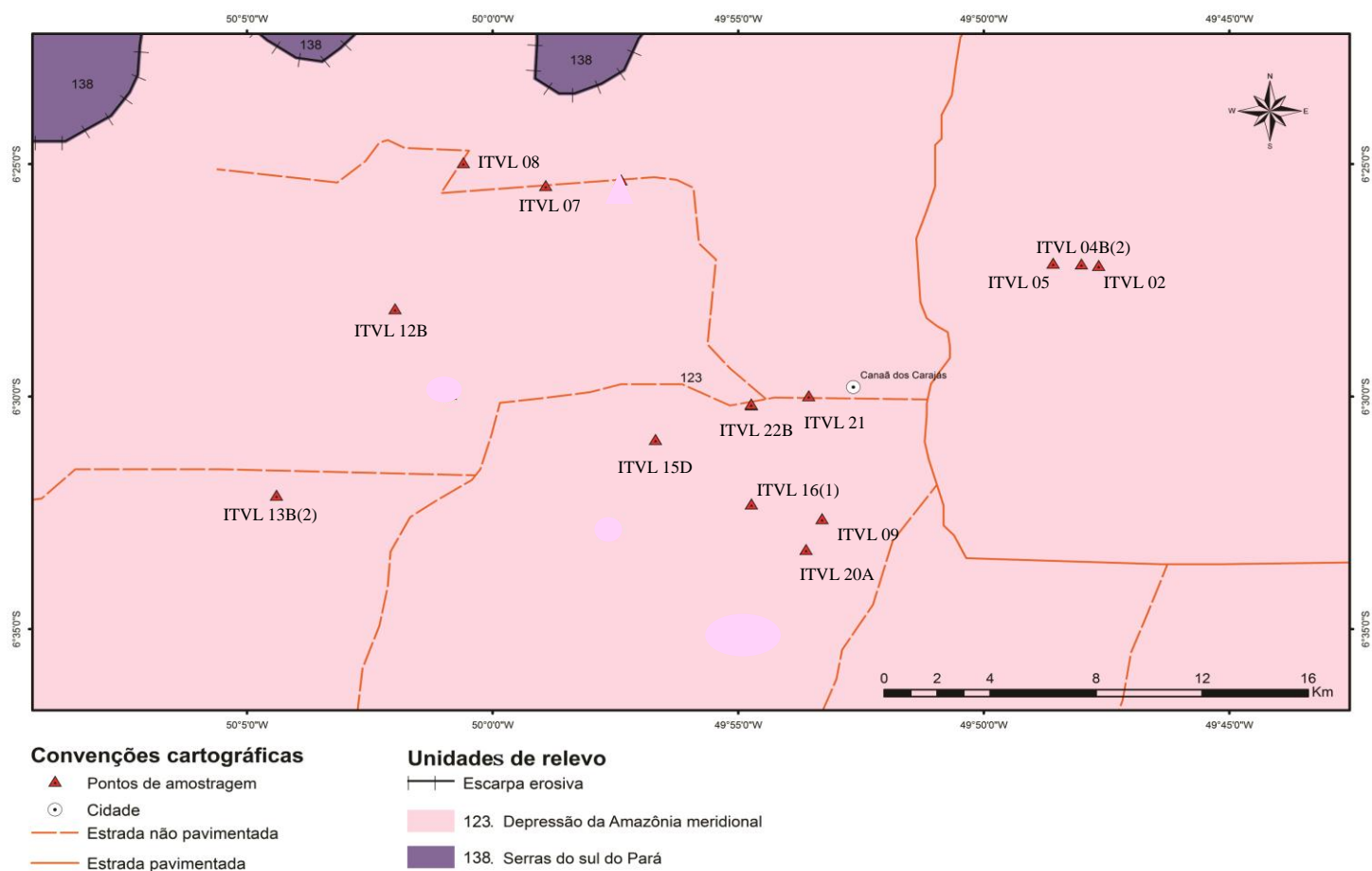


Figura 3- Mapa de unidades de relevo da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas.  
 Fonte: Modificado de IBGE (2006), escala 1:5.000.000.

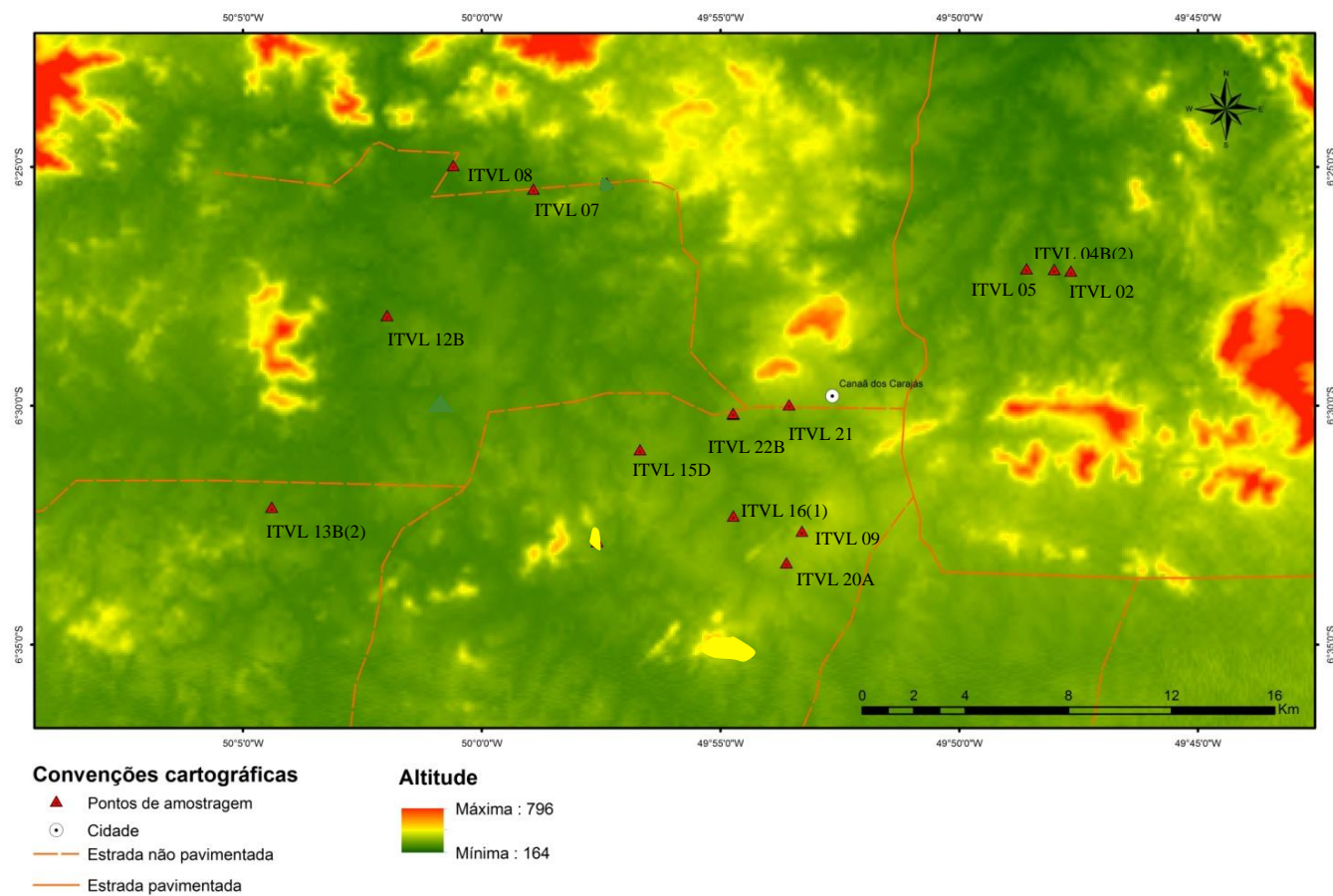


Figura 4- Imagem SRTM (banda SIR-C 90 m) com a localização das amostras coletadas e investigadas.  
 Fonte: Modificado de USGS (2017).

### 3.3 SOLO

A área de pesquisa é constituída por argissolo vermelho-amarelo distrófico, conforme mapa da figura 5. Esta classificação de solo tem relação direta com as condições climáticas, agentes intempéricos, tempo de exposição e composição de rochas nos horizontes superiores (Costa 1991, Horbe 1995, Kotschoubey *et al.* 2005a).

Os argissolos formam a segunda maior classe de solos do Brasil e ocorrem em aproximadamente 70% do Domínio Carajás (Araújo *et al.* 1991, Embrapa 2006). Este tipo pedológico constitui solos ácidos, de fertilidade baixa e profundidade variável que ocorrem em relevos mais dissecados e acidentados, bastante susceptíveis à erosão, típicos da região Amazônica (Araújo *et al.* 1991, Coelho *et al.* 2002).

O argissolo vermelho-amarelo distrófico da área de estudo, conforme IBGE (2008), é subclassificado em PVAd20 (solo muito argiloso a argiloso, com grãos de areia média) e PVAd24 (solo muito argiloso, com grãos de areia média). As siglas PVAd20 e PVAd24 também tem relação com a diversidade da área e representam, respectivamente, associações com latossolo vermelho-amarelo e latossolo amarelo distrófico (Embrapa 2006).

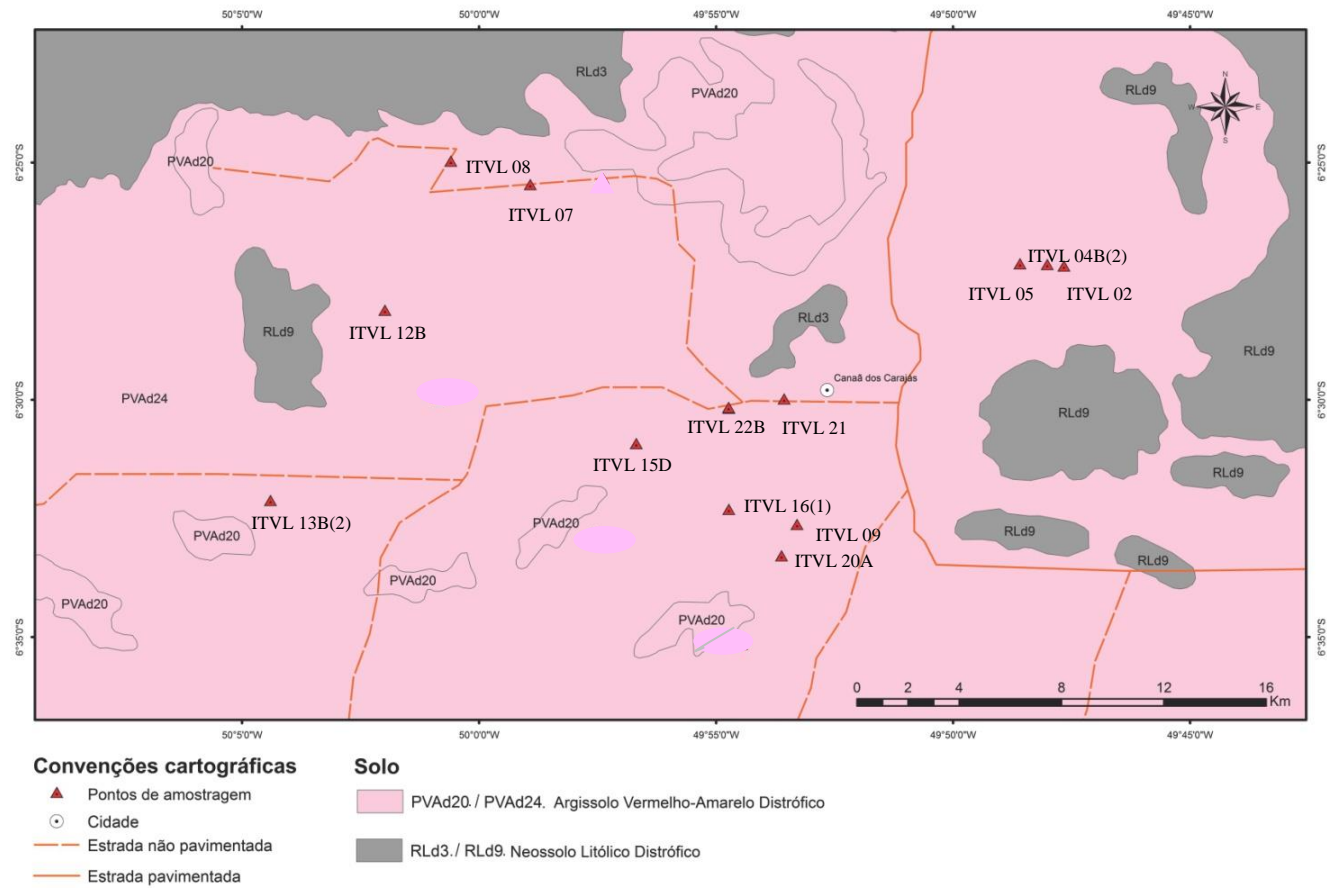


Figura 5- Mapa esquemático de solos da região de Canaã dos Carajás com a localização das amostras coletadas e investigadas.  
 Fonte: Modificado de IBGE (2008), escala 1:1.800.000.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CROSTA LATERÍTICA FERRUGINOSA

#### 4.1.1 Aspectos texturais macroscópicos e microscópicos

As crostas lateríticas tem textura maciça a pouco porosa e porosa. As figuras 6, 7 e 8 mostram o aspecto geral das amostras estudadas, em que o arcabouço é constituído por material ferruginoso de cor marrom avermelhada a ocre, por vezes em tons mais claros.

As cavidades, quando presentes, são milimétricas ou eventualmente atingem poucos centímetros (1-2 cm). Estas pequenas cavidades são arredondadas a angulosas, eventualmente em forma de canais, e possivelmente resultam da perfuração por raízes. É comum notar o preenchimento parcial ou total das cavidades por matriz areno-argilosa em quantidades variáveis ou o revestimento destas por goethita.

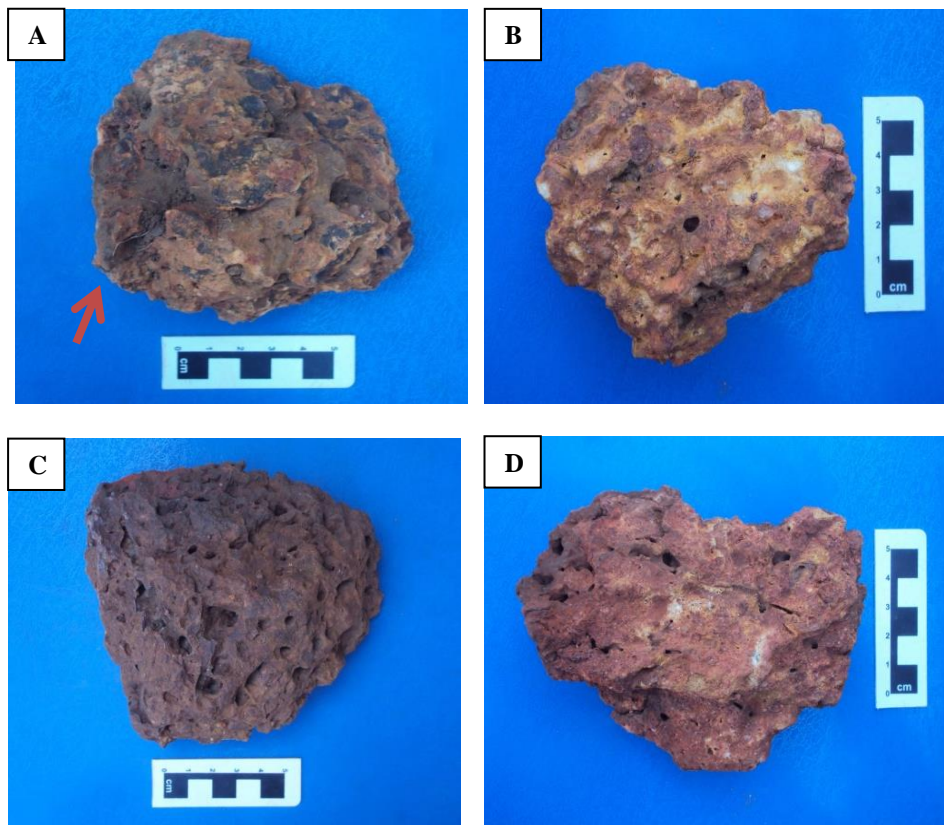


Figura 6- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. Nas amostras de crostas lateríticas ferruginosas (A) ITVL 02, (B) ITVL 07, (C) ITVL 08 e (D) ITVL 09 nota-se cavidades arredondadas a angulosas. Em (A) é possível observar pontuações escuras e cavidade preenchida por material terroso, vide indicação por seta.

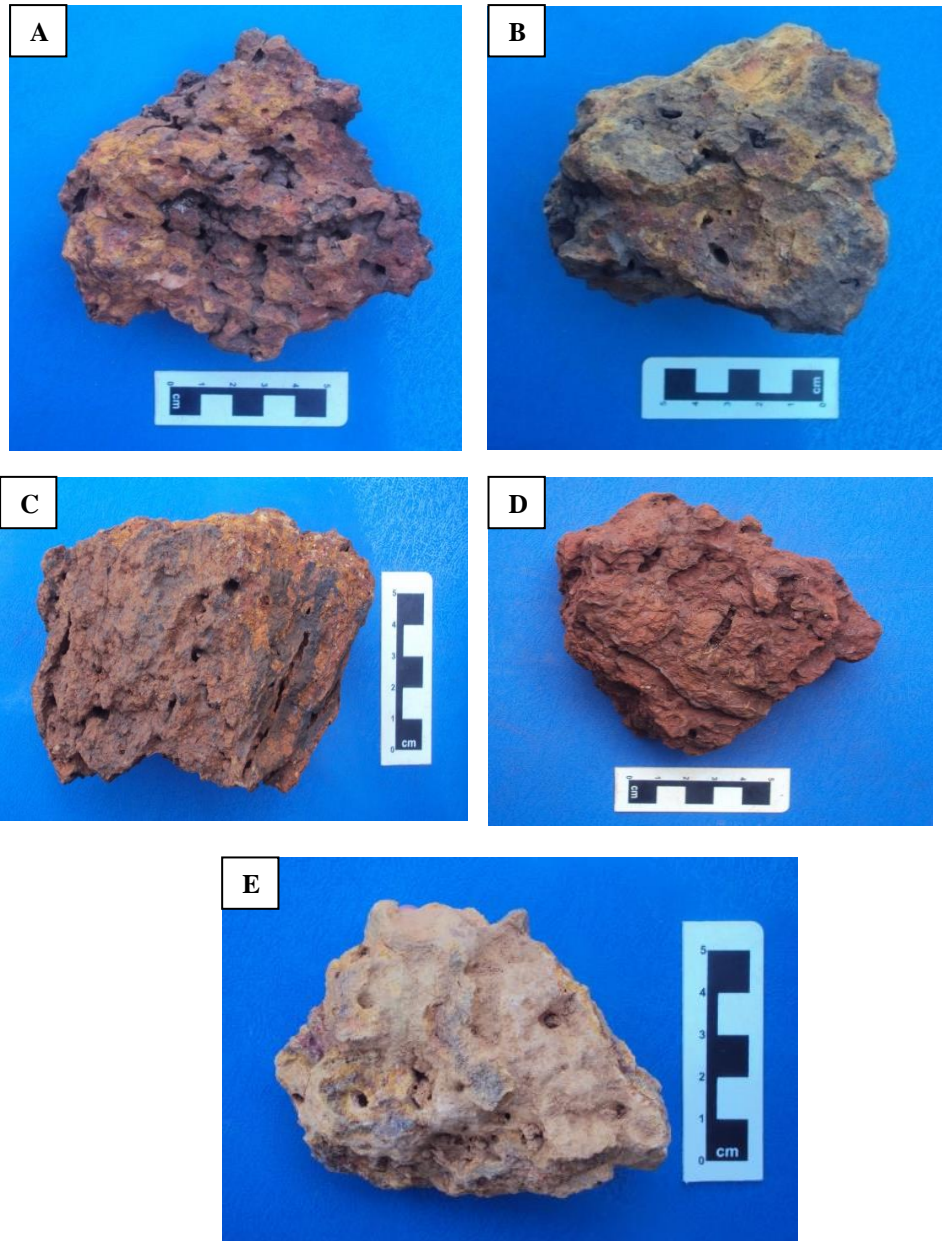


Figura 7- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 12B: crosta porosa; (B) ITVL 13B(2): crosta predominantemente maciça, com a presença de raras cavidades; (C) ITVL 16(1): crosta em que se observam cavidades alongadas, além de porções escuras; (D) ITVL 20A: crosta ferruginosa com cavidades canalizadas e goethitizadas; (E) ITVL 22B: crosta porosa friável constituída por material argiloso de cor creme a esbranquiçada, provavelmente devido à presença de caulinita.

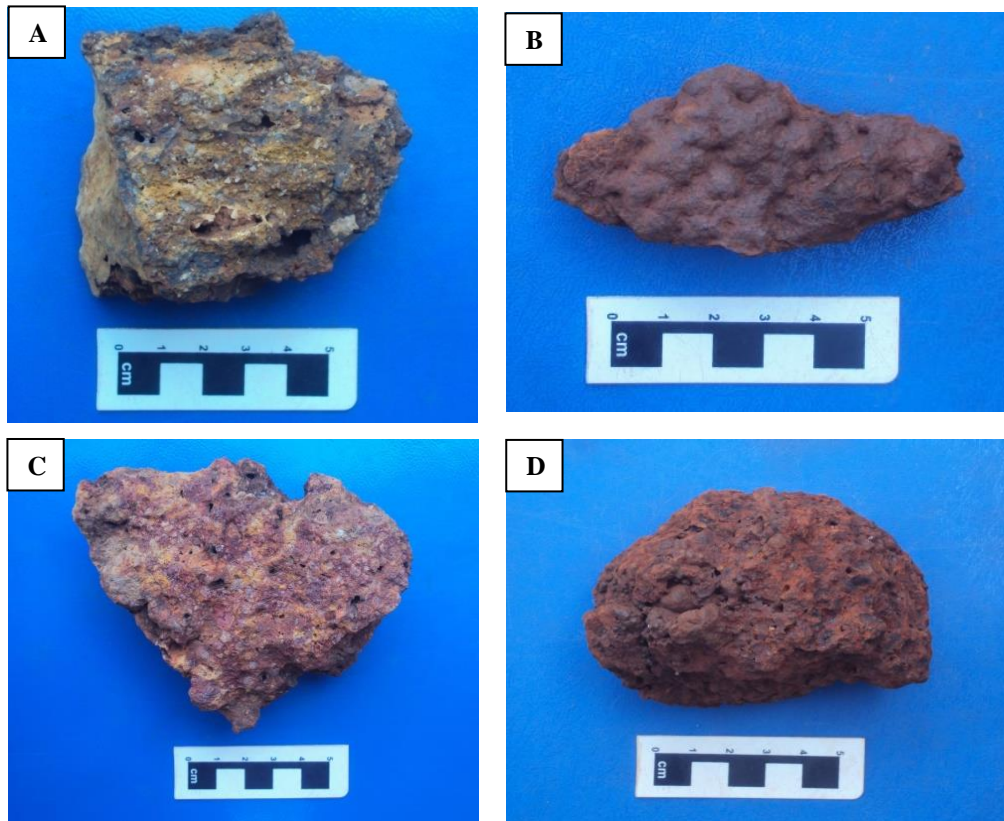


Figura 8- Amostras de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 04B(2) e (C) ITVL 05: crostas ferruginosas que apresentam fragmentos de quartzo em sua porção superior; (B) ITVL 15D: crosta ferruginosa com feições arredondadas em sua porção superior; (D) ITVL 21: crosta ferruginosa maciça a pouco porosa.

As fotomicrografias da figura 9 mostram que as crostas são constituídas por plasma criptocristalino ferro-caulinítico, por vezes goethítico-caulinítico. Também são observados diversos poros arredondados a angulosos formados pela dissolução de grãos de quartzo durante a formação da crosta.

Os poros usualmente contêm vestígios de grãos de quartzo fraturados e/ou corroídos. A forma interna dos poros apresentam seções transversais que mostram que os grãos de quartzo apresentavam formas arredondadas e/ou angulosas que podem mostrar proveniências diferentes do material que ficou agregado à trama textural da crosta.

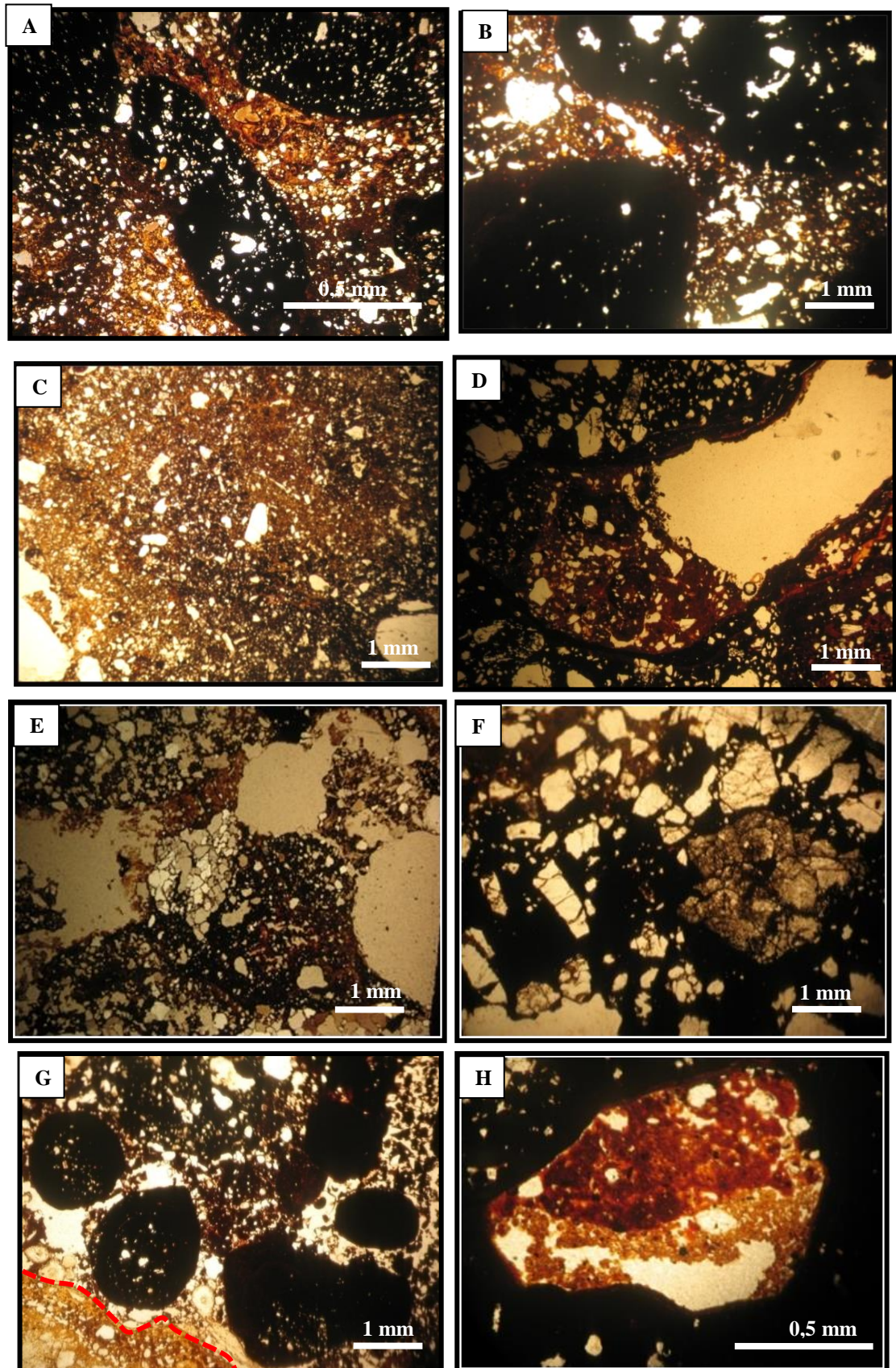


Figura 9- Fotomicrografias de crostas de horizonte ferruginoso. (A) ITVL 04B(2) e (B) ITVL 07: nódulos porosos cimentados por plasma ferruginoso, representado em (C) ITVL 08; (D) ITVL 09 e (H) ITVL 21: respectivos pisólito e nódulo digeridos, parcialmente, pelo plasma; (E) ITVL 15D e (F) ITVL 16(1): poros de dissolução e resquíços de quartzo fraturados e/ou corroídos, cimentados por plasma de oxi-hidróxido de ferro; (G) ITVL 20A: nódulos e contato (indicado por linha tracejada) entre plasma goethítico e hematítico. Nicóis //.

#### 4.1.2 Mineralogia por DRX e FTIR

Independente da estruturação interna da crosta, sua matriz é composta basicamente por hematita, goethita, caulinita e quartzo. As seguintes bandas de estiramento indicadas para crostas lateríticas nas análises por infravermelho estão de acordo com atribuições de (Cavalcante *et al.* 2014, Fungaro & Borrely 2010, Martinello 2014, Martins 2000, Ragassi & Parabocz 2014, Salama *et al.* 2015, Yamaura *et al.* 2005).

- Características FTIR da hematita: as bandas  $467\text{ cm}^{-1}$ ,  $470\text{ cm}^{-1}$  e  $541\text{ cm}^{-1}$  são correspondentes à hematita.

- Características FTIR da goethita: as bandas  $794\text{ cm}^{-1}$  e  $805\text{ cm}^{-1}$  são correlacionáveis ao estiramento  $\nu\text{-OH}$  e a banda  $3120\text{ cm}^{-1}$  está provavelmente relacionada ao maior estiramento O–H na estrutura cristalina da goethita.

- Características FTIR da caulinita: as bandas  $913\text{ cm}^{-1}$  e  $914\text{ cm}^{-1}$  representam o estiramento Al–O–H e a banda  $1033\text{ cm}^{-1}$  o estiramento Si–O–Si, correspondentes à estrutura da caulinita. Além do mais, há bandas no espectro do infravermelho em que a caulinita se apresenta de acordo com o estiramento da hidroxila (estiramento Al–O–H). As bandas  $3620\text{ cm}^{-1}$  e  $3621\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas aos estiramentos das hidroxilas internas da caulinita. As bandas  $3696\text{ cm}^{-1}$  e  $3697\text{ cm}^{-1}$  às vibrações das hidroxilas da superfície externa da caulinita. A banda mais intensa é  $3695\text{ cm}^{-1}$  e está associada aos estiramentos das hidroxilas da superfície.

- Características FTIR do quartzo: as bandas  $462\text{ cm}^{-1}$ ,  $694\text{ cm}^{-1}$ ,  $695\text{ cm}^{-1}$ ,  $798\text{ cm}^{-1}$ ,  $1005\text{ cm}^{-1}$ ,  $1090\text{ cm}^{-1}$  e  $1102\text{ cm}^{-1}$  são correspondentes ao estiramento Si–O.

- Características FTIR de moléculas de água: as bandas  $1629\text{ cm}^{-1}$  e  $1637\text{ cm}^{-1}$  podem estar associadas à vibração e estiramento H–O–H das moléculas de água adsorvidas na caulinita.

As análises por infravermelho foram complementadas por análises de difração de raios-X, agrupando-se mineralogicamente três domínios: (I) crostas com picos quase que equivalentes de goethita e hematita e, subordinadamente, caulinita e quartzo; (II) crostas goethíticas-hematíticas e (III) crostas com picos dominantes de hematita.

No primeiro grupo está a maioria das amostras: ITVL 02, ITVL 07, ITVL 08, ITVL 09, ITVL 12B, ITVL 13B(2), ITVL 16(1), ITVL 20A e ITVL 22B. Na caracterização mineralógica por FTIR, estas crostas apresentaram bandas de estiramento Al–O–H ( $914\text{ cm}^{-1}$ ,  $3620\text{ cm}^{-1}$ ,  $3621\text{ cm}^{-1}$ ,  $3695\text{ cm}^{-1}$  e  $3696\text{ cm}^{-1}$ ), Si–O ( $694\text{ cm}^{-1}$ ,  $695\text{ cm}^{-1}$  e  $1005\text{ cm}^{-1}$ ), Si–O–Si ( $1033\text{ cm}^{-1}$ ),  $\gamma$ -OH ( $794\text{ cm}^{-1}$ ), H–O–H ( $1629\text{ cm}^{-1}$  e  $1637\text{ cm}^{-1}$ ) e hem ( $467\text{ cm}^{-1}$  e  $541\text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 10).

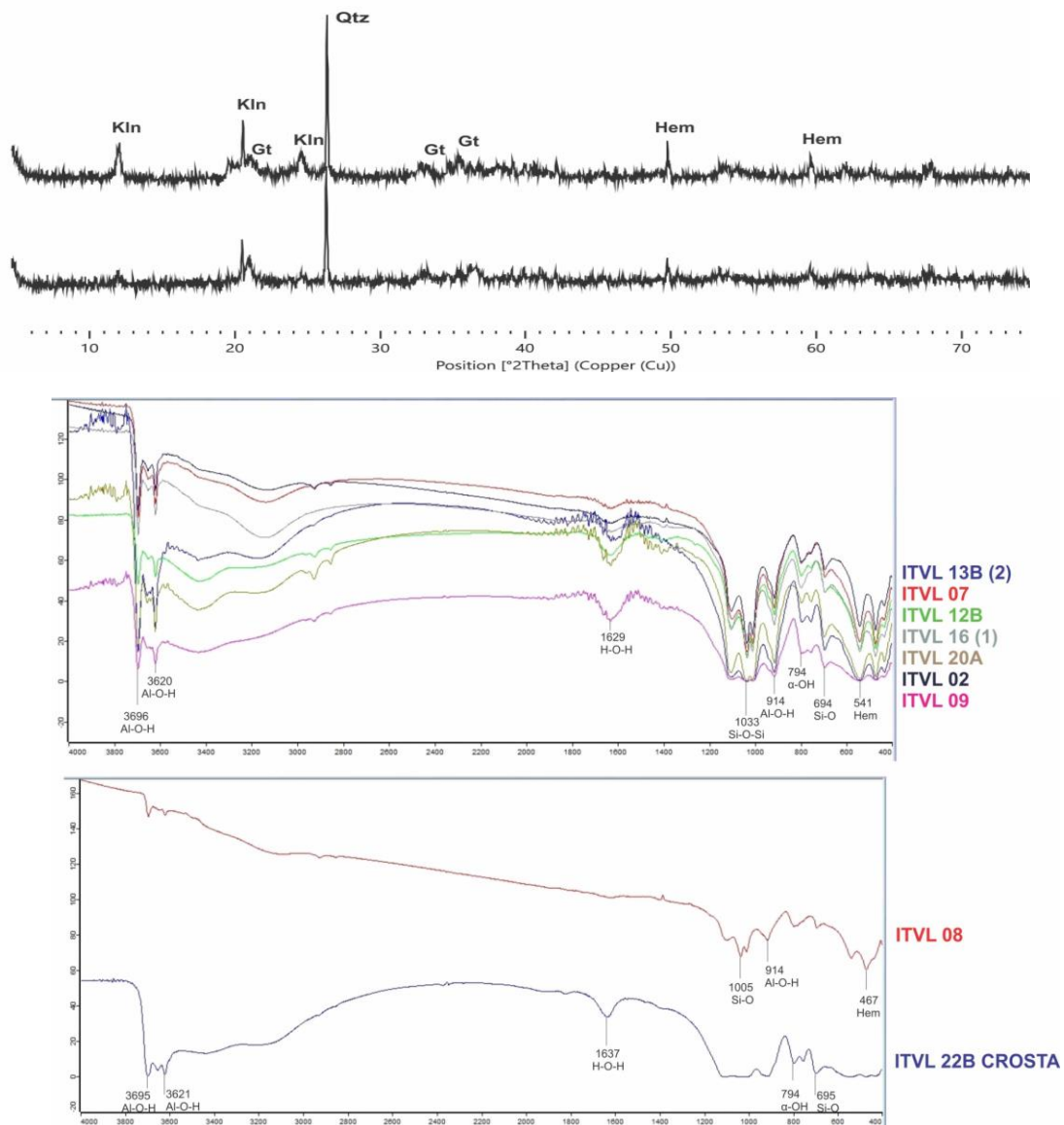


Figura 10- Difratomogramas de raios-X de crostas lateríticas, em que se identificam caulinita (Kln), goethita (Gt), quartzo (Qtz) e hematita (Hem); e espectros de absorção no infravermelho com indicação dos grupos funcionais e valores das bandas de estiramento. (Domínio I).

O segundo grupo de crostas está indicado na figura 11, em que são observados os acentuados picos de goethita em relação a picos de hematita e caulinita. Na caracterização mineralógica por FTIR, as mesmas amostras (ITVL 04B(2), ITVL 05 e ITVL 21) apresentaram bandas de estiramento Al–O–H ( $913\text{ cm}^{-1}$ ,  $3620\text{ cm}^{-1}$  e  $3695\text{ cm}^{-1}$ ), O–H ( $3120\text{ cm}^{-1}$ ), Si–O ( $1102\text{ cm}^{-1}$ ), Si–O–Si ( $1033\text{ cm}^{-1}$ ),  $\nu$ -OH ( $805\text{ cm}^{-1}$ ) e hem ( $470\text{ cm}^{-1}$ ).

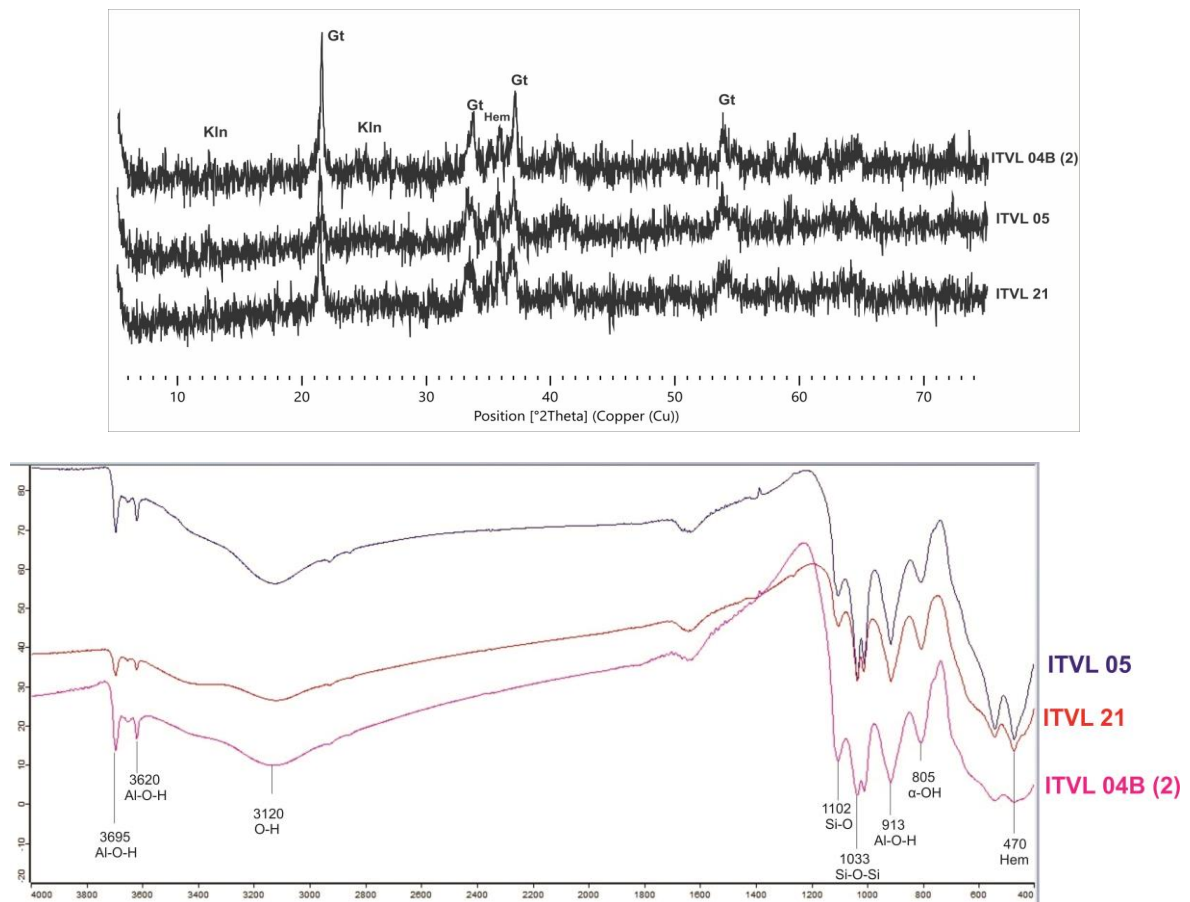


Figura 11- Difratoformas de raios-X de crostas lateríticas, em que se identificam caulinita (Kln), goethita (Gt) e hematita (Hem); e espectros de absorção no infravermelho de crostas lateríticas ITVL 04B(2), ITVL 05 e ITVL 21 com indicação dos grupos funcionais e valores de bandas de estiramento. (Domínio II).

Por fim, no terceiro grupo, está a amostra ITVL 15D, em que são característicos elevados picos de hematita. Ao FTIR a amostra ITVL 15D apresentou espectros de absorção na estrutura interna da caulinita ( $1033\text{ cm}^{-1}$ ) e da hematita ( $467\text{ cm}^{-1}$  e  $541\text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 12).

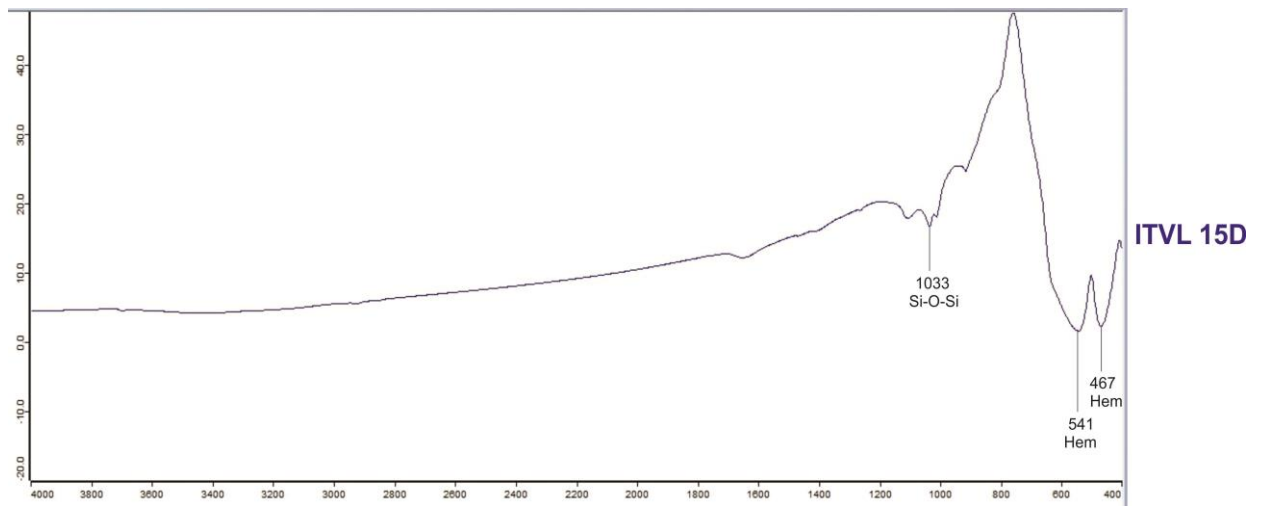
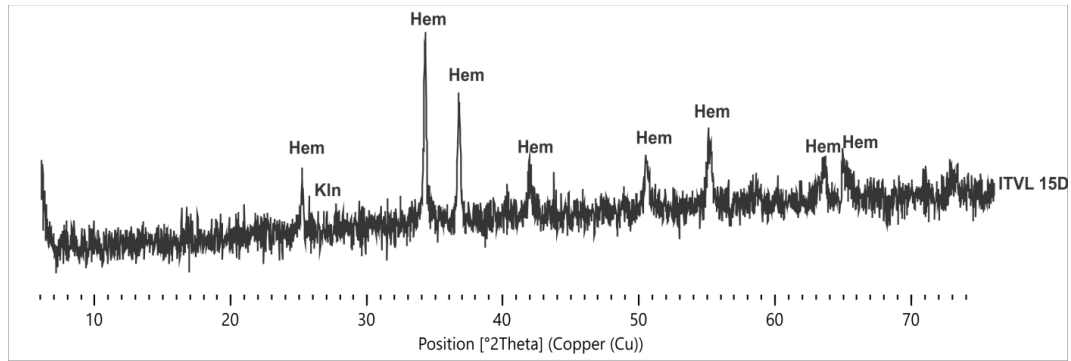


Figura 12- Difratoformas de raios-X de crosta laterítica ITVL 15D, em que se identificam hematita (Hem) e caulinita (Kln); e espectros de absorção no infravermelho de crosta laterítica ITVL 15D com indicação dos grupos funcionais e valores de bandas de estiramento. (Domínio III).

#### 4.1.3 Morfologia e química

As fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostram a morfologia dos cristalitos observados em crostas lateríticas ferruginosas, e suas respectivas análises químicas pontuais por espectroscopia dispersiva de energia (EDS), confirmando os domínios semiquantitativos de Fe, Al e Si.

As análises por EDS da maioria das amostras estudadas confirmam a ocorrência de um plasma constituído por agregados microcristalinos predominantes de oxi-hidróxido de ferro, conforme figuras 13 e 14. Entretanto, destaca-se que as amostras ITVL 05, ITVL 16(1) e ITVL 21 mostraram aspectos semiquantitativos semelhantes, com a ocorrência de um pequeno pico de Cr, conforme representado na figura 14E.

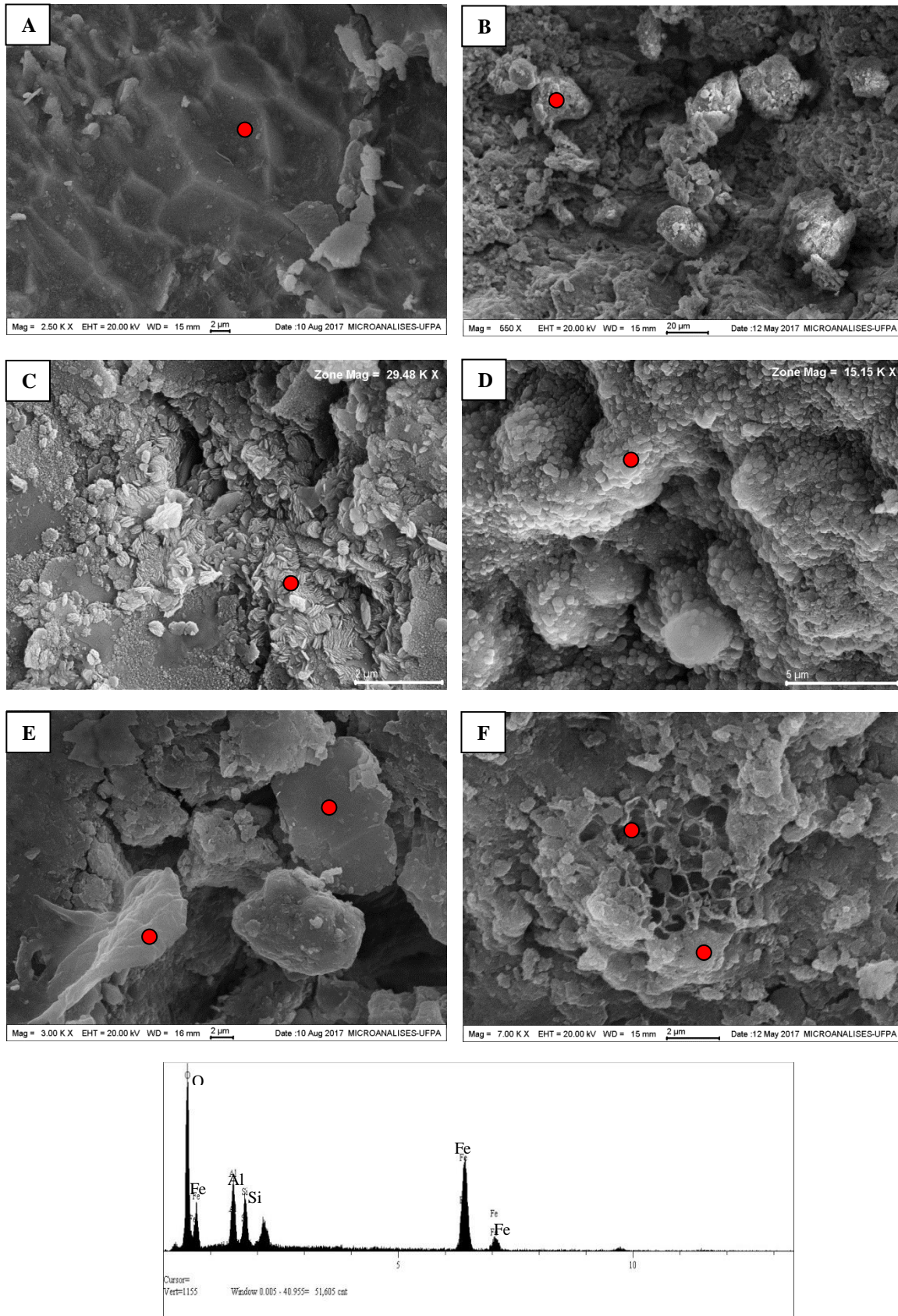


Figura 13- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 02: feições côncavas observadas em matriz. Agregados subédricos em (B) ITVL 04B(2) de oxi-hidróxido de ferro. (C) ITVL 07: formação de nanoplacas de goethita ( $\alpha$ -FeOOH), associada à caulinita. (D) ITVL 07: cristalitos formando feições botrioidais de goethita. Agregados placosos em (E) e (F), amostra ITVL 12B, de oxi-hidróxido de ferro. Abaixo está indicada a análise por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho.

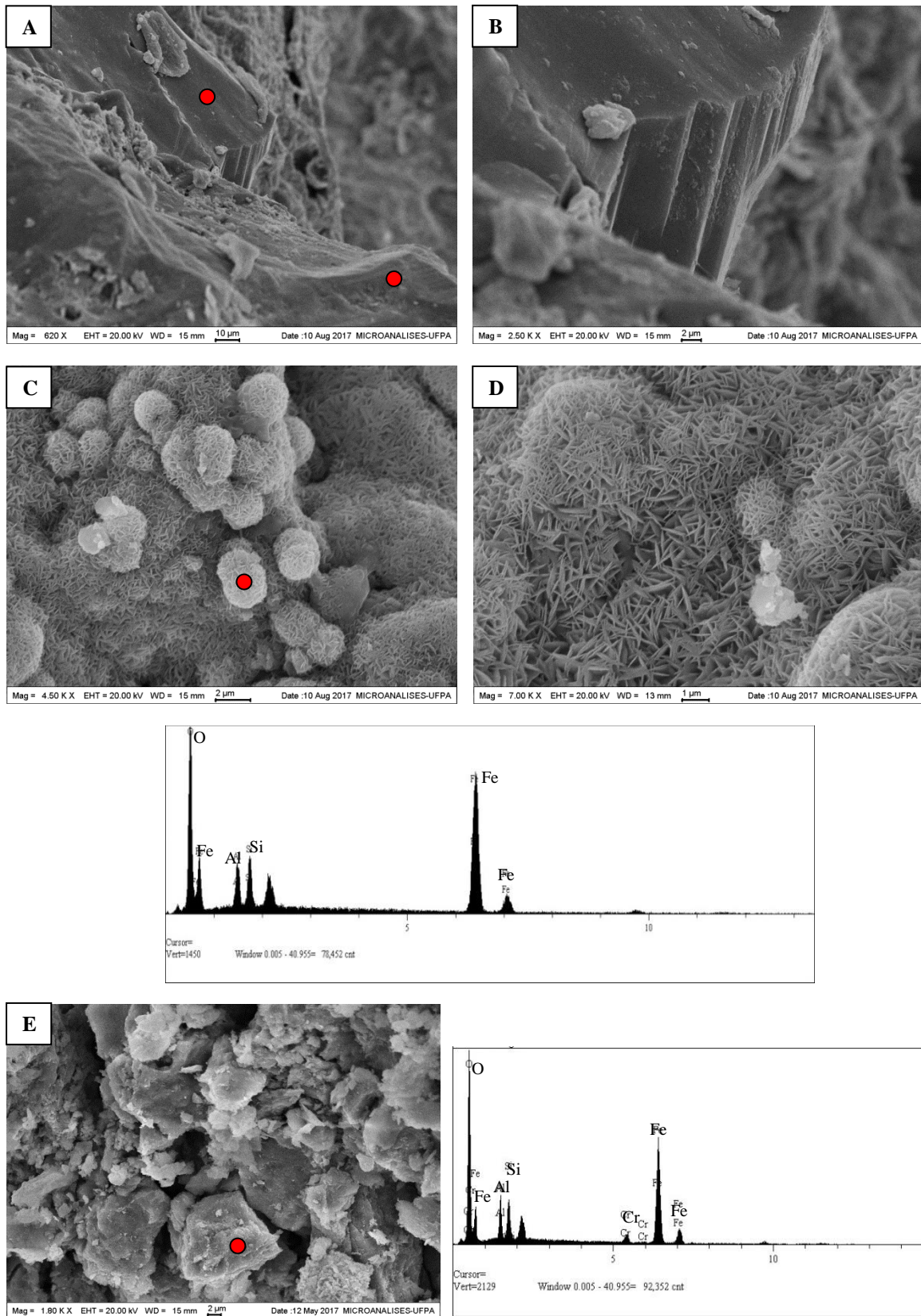
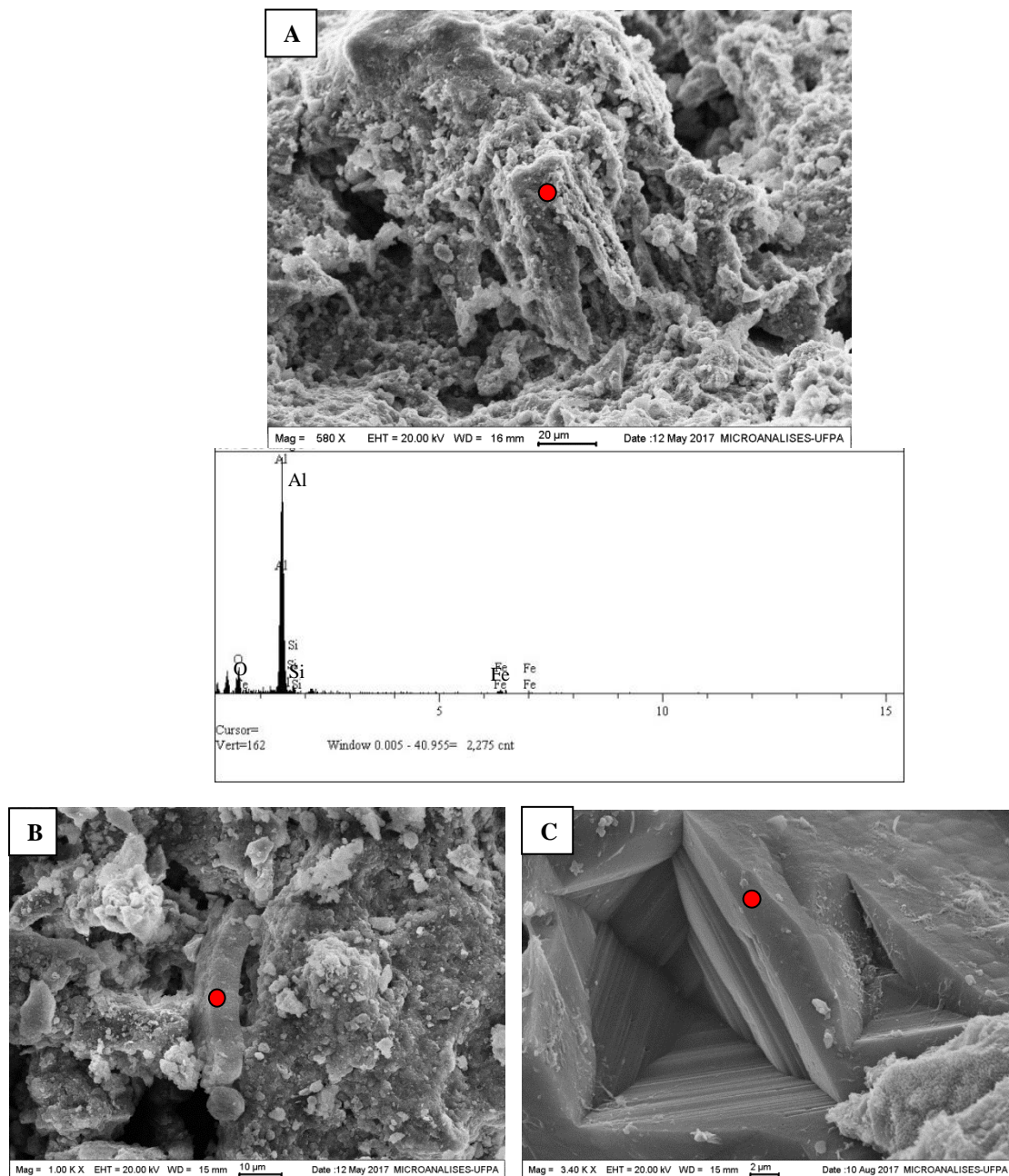


Figura 14- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 12B: aglomerados de cristaltos de oxi-hidróxido de ferro e, em maior escala, (B) nota-se estes em forma de rosetas. (C) ITVL 15D: lamelas de oxi-hidróxido de ferro e, em (D), estas feições são observadas em detalhe. Abaixo está análise por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho. (E) ITVL 05: agregados de oxi-hidróxido de ferro e, ao lado, sua análise por EDS, em que ocorre um pequeno pico de Cr.

Em determinadas porções da matriz ferruginosa foram identificadas micromorfologias com predominância semi-quantitativa de apenas um elemento. A figura 15 mostra imagens de MEV e análises pontuais por EDS em que se observou a ocorrência de Fe (Figura 15A), Al (Figura 15B) e Si (Figuras 15C).



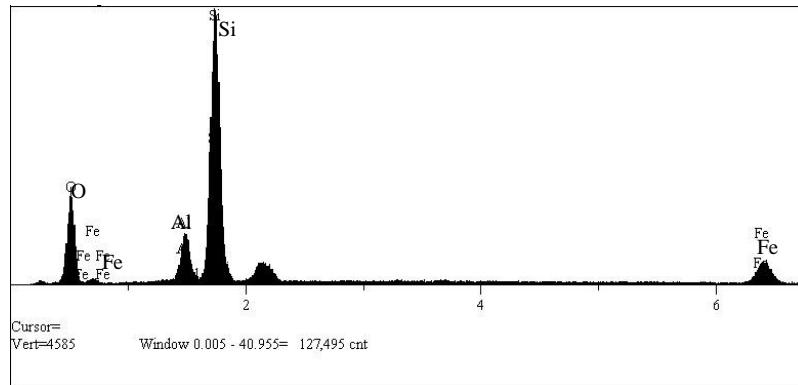


Figura 15- Imagens de MEV de aspectos pontuais de crosta ferruginosa. (A) ITVL 16(1): cristalitos de caulinita formando colunas. Análise por EDS mostrada abaixo, indicando o domínio de alumínio. (B) ITVL 02 e (C) ITVL 12B: feições observadas em matriz ferruginosa. Abaixo está a análise por EDS comum aos pontos demarcados em vermelho, em que se observa dominância em Si.

#### 4.1.4 Comportamento térmico

O comportamento térmico de crosta laterítica está mostrado na figura 16.

No início da curva, registrou-se inicialmente perda de massa correspondente à umidade (cerca de 1,63%). O primeiro pico endotérmico está indicado a 299,95°C, provavelmente associado à decomposição da goethita com formação de hematita, intervalo de 260°C a 691°C, com perda de 3,02%.

O segundo pico endotérmico (a 472,28°C) está relacionado à dehidroxilação da caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH}_4)$ ), entre as faixas de temperatura 420°C a 570°C, com perda de 6,29%. A 1030°C observa-se ligeiro pico exotérmico atribuído à possível formação da mulita.

As informações descritas acima podem ser comparadas a Mercury *et al.* 2010, Santos *et al.* 2006, Pereira *et al.* 2007.

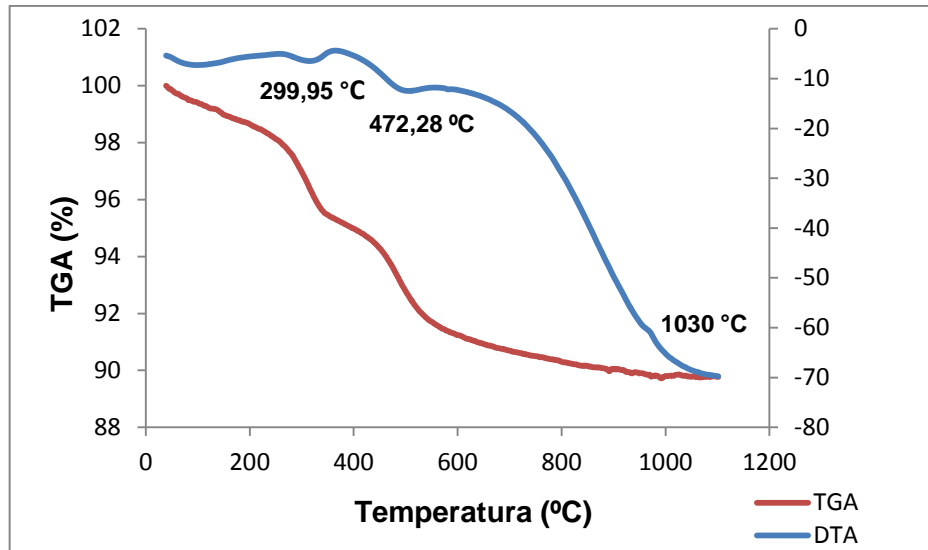


Figura 16- Termograma de alíquota de crosta com a presença de dois picos endotérmicos e ligeiro pico exotérmico.

#### 4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Anand & Paine (2002), Bardóssy & Aleva (1990), Costa (2007), L. Zhou *et al.* (2013), dentre outros, descrevem a variação química de perfis lateríticos ao longo da sucessão entre horizontes devido ao comportamento de elementos e compostos químicos relacionados à composição da rocha mãe, grau de evolução, condições de formação e transformações pós-lateritização.

A tabela 1 apresenta a composição química de crostas lateríticas expressa em elementos maiores e menores e em elementos-traço, identificando-se, dentre as amostras, padrões químicos diagnósticos do seu protólito.

Tabela 1- Composição química expressa em % peso (elementos maiores e menores) e ppm (elementos-traço); n.a.: não analisado. Os resultados indicam possível proveniência de rochas ácidas, enquanto que as amostras indicadas por \* representam amostras de crostas provenientes de rochas intermediárias a básicas.

(continua)

Elem.	ITVL-02	*ITVL-04B(2)	*ITVL-05	ITVL-07	ITVL-08	ITVL-09	ITVL-12B	ITVL-13B(2)	*ITVL-15D	*ITVL-16(1)	*ITVL-20A	*ITVL-21	ITVL-22B
SiO <sub>2</sub> (%)	46,05	9,93	8,78	39,41	46,89	46,50	40,47	51,56	1,28	38,82	31,06	4,18	46,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,51	11,92	9,80	17,37	10,49	16,55	16,60	13,26	0,80	12,87	25	7,94	23,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,80	61,48	65,46	31,15	32,7	26,88	30,82	23,87	96,19	33,32	26,70	70,60	18,06
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,04	0,04	0,06	0,02	0,06	0,02	0,04	0,02	0,01	0,04	0,02	0,07	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,17	0,18	0,11	0,15	0,07	0,31	0,12	0,10	0,16	0,05	0,03	0,03
K <sub>2</sub> O	0,05	0,01	0,01	0,05	0,13	0,05	0,07	0,05	0,01	0,11	0,02	0,01	0,07
CaO	0,04	0,01	0,02	0,02	0,10	0,04	0,08	0,04	0,02	0,03	0,01	n.a.	n.a.
TiO <sub>2</sub>	0,72	0,32	0,27	0,64	0,69	1,07	0,59	0,79	0,2	0,14	0,41	0,34	0,56
P.F.	11,30	12,30	11,30	10,90	8,50	8,50	10,60	9,70	1,10	12,20	13,40	10,40	11,90
V (ppm)	320	147	153	406	214	352	493	303	778	82	139	146	294
Cr	998,95	21730,51	22585,77	294,21	88,95	588,42	595,26	1211,05	88,95	10140	21204	41018,39	780
Mn	1084,24	387,23	1548,92	77,45	232,34	387,23	154,89	542,12	154,89	3872,30	697,01	232,34	77,45
Co	26,40	65,90	137,40	6,10	13,60	8,20	6,20	7,70	53,20	198,20	21,50	67	4,40
Ni	23,50	1509,90	1610,40	8,50	4,80	4,20	8	21,10	183,50	762,10	33,10	900,90	4,10
Cu	43,10	31,30	38,70	446,30	332,60	68,30	135,60	99,80	247,30	29,40	18,10	41	34,30
Zn	4	65	58	3	6	10	24	11	2	41	12	55	8
Ga	27,30	14,80	12,60	28,70	19,10	25,30	28	17,50	73,80	15,80	35,80	16,70	43,70
As	3,60	n.a.	0,60	4,90	2	4,90	4,50	2,50	1,30	3,30	n.a.	n.a.	3,60
Se	0,50	3	1,30	0,70	0,50	0,90	1,70	1,20	0,50	0,50	2,60	2,90	0,70
Rb	3,10	1,80	1,70	3,80	13,40	5,20	10,10	5,60	0,30	11,80	2,20	0,80	4,90
Sr	6,70	1,40	1,70	4,20	6,40	3,50	10,20	5,60	18,30	4,40	2,40	0,50	3
Y	3,70	4,60	3,30	6,20	25	10,10	3,70	16,90	6,50	50,20	2,70	5	2,20
Zr	688,80	68,70	38,10	366,30	394,70	328,60	682,70	1449,10	4,50	135,60	195,4	117,90	347,40
Nb	6,60	3,50	2,30	11,20	11,60	11,8	8,20	6,50	34,20	4,80	7	5,20	8,90
Mo	1	0,10	0,10	12,50	3,20	6,60	5,40	1,90	2,30	8,90	0,20	0,70	2,60
Cd	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Sn	1	1	1	1	1	1	3	1	11	1	1	1	1
Sb	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Cs	0,20	n.a.	0,10	0,10	0,40	0,10	0,40	0,20	n.a.	0,50	n.a.	n.a.	0,1
Ba	30	5	80	17	65	10	37	69	295	540	69	1	9
La	4,50	6,10	4,20	13,40	9,50	1,80	9,30	8,60	20,80	10,10	2,90	4,90	5,20
Ce	20,80	14,10	143,40	26,2	23,80	4,50	214,8	19,60	18,60	83,4	74,90	18,30	16,70
Pr	0,93	1,75	1,20	2,18	2,02	0,35	1,64	1,79	2,32	2,25	0,75	1,93	0,96
Nd	3,20	6,10	4,40	6,70	6,90	1,80	6,50	6	7,30	8,20	2,60	8	3,40
Sm	0,68	1,42	0,98	1,02	1,77	0,33	1,01	1,53	1,61	2,19	0,50	1,90	0,55
Eu	0,17	0,42	0,30	0,23	0,43	0,06	0,24	0,45	0,15	0,16	0,16	0,39	0,13
Gd	0,55	1,09	1,26	0,91	2,67	0,66	1,38	1,84	1,50	3,86	0,62	1,47	0,32
Tb	0,09	0,21	0,17	0,18	0,56	0,16	0,15	0,39	0,24	0,93	0,09	0,28	0,06

(conclusão)

Elem.	ITVL-02	*ITVL-04B(2)	*ITVL-05	ITVL-07	ITVL-08	ITVL-09	ITVL-12B	ITVL-13B(2)	*ITVL-15D	*ITVL-16(1)	*ITVL-20A	*ITVL-21	ITVL-22B
Dy	0,57	1,45	0,89	1,01	4,35	1,32	0,73	2,75	1,46	6,94	0,58	1,80	0,52
Ho	<b>0,13</b>	<b>0,24</b>	<b>0,19</b>	<b>0,24</b>	<b>0,95</b>	<b>0,32</b>	<b>0,16</b>	<b>0,68</b>	<b>0,31</b>	<b>1,69</b>	<b>0,11</b>	<b>0,28</b>	<b>0,13</b>
Er	0,39	0,77	0,57	0,74	3,22	1,08	0,48	2,52	0,97	5,38	0,45	0,91	0,28
Tm	0,07	0,14	0,11	0,14	0,44	0,22	0,09	0,50	0,15	0,93	0,07	0,20	0,05
Yb	0,64	0,92	0,75	0,96	3,15	1,53	0,75	3,95	1,04	6,50	0,63	1,67	1,32
Lu	0,11	0,15	0,11	0,19	0,47	0,27	0,12	0,79	0,13	1,02	0,11	0,24	0,07
Hf	17	1,60	1,20	9,60	9,90	10	17,30	51,5	0,10	4,80	5,50	3,20	9,80
Ta	0,40	0,10	0,10	0,90	0,90	1,30	0,60	0,40	1,50	0,70	0,60	0,40	0,70
W	7,40	2,60	2,90	6,60	10	19,90	9,10	7,20	9,50	21,10	4,20	3,20	15,20
Hg	0,21	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,06	0,01	0,08	0,09	0,20	0,16
Pb	20,10	17,9	18,30	21	8,50	20,80	29,30	16,20	6,20	133,70	97,50	16,90	16,30
Bi	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10
Th	8,70	3,5	3,50	48,60	13,80	15,70	38	24,40	11,90	35,40	16,10	9,10	35
U	1,40	2,10	3,80	17,70	5,60	18,10	3,50	8,60	4,50	29	4,80	10,10	4,60
ΣETRL	30,28	29,89	154,50	49,73	44,42	8,84	233,49	37,97	50,78	106,3	81,81	35,42	26,94
ΣETRP	2,55	4,97	4,05	4,37	15,81	5,56	3,86	13,42	5,80	27,25	2,66	6,85	2,75
ΣETR	32,83	34,86	158,55	54,10	60,23	14,40	237,35	51,39	56,58	133,55	84,47	42,27	29,69
(La/Yb) <sub>N</sub>	4,55	4,29	3,62	9,03	1,95	0,76	8,02	1,41	12,94	1,01	2,98	1,90	2,55
(La/Sm) <sub>N</sub>	3,33	5,42	3,09	1,95	4,70	1,56	3,68	2,58	2,46	7,41	2,92	2,65	1,48
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0,83	0,21	0,85	0,55	0,51	0,89	1,03	1,10	1	1,22	0,44	0,50	0,74
Eu <sub>N</sub> /Eu*	0,83	1,003	0,83	0,72	0,61	0,39	0,63	0,83	0,29	0,17	0,89	0,69	0,88
Ce <sub>N</sub> /Ce*	11,18	1,58	0,76	1,48	3,94	1,93	3,14	2,48	0,96	0,51	5,43	3,79	1,32

Na tabela 2 são comparados os valores médios das concentrações de elementos em crostas do Domínio Canaã em relação à média crustal (Taylor & McLennan 2001).

A tabela 3, por sua vez, apresenta concentrações padrões dos principais elementos que caracterizam crostas derivadas, respectivamente, de granitos, basaltos e de rochas ultramáficas, conforme Schellman (1980) *apud* Costa (2007). Nota-se que a maioria das amostras assemelha-se a crostas derivadas de rochas aluminossilicáticas (rochas ácidas conforme classificação química com base na % em massa de SiO<sub>2</sub>). As amostras ITVL 04B(2), ITVL 05, ITVL 15D, ITVL 16(1), ITVL 20A e ITVL 21 apresentaram um comportamento mineralógico e químico bem peculiar, assemelhando-se a crostas derivadas de rochas máficas (intermediárias a básicas), classificações também baseadas na % em massa de SiO<sub>2</sub>.

Tabela 2- Concentrações médias de elementos em % peso (elementos maiores e menores) e ppm (elementos-traço) das amostras de crostas lateríticas do Domínio Canaã comparadas à média crustal; n.a.: não analisado.

(continua)

<b>Elem.</b>	<b>Média das crostas (Domínio Canaã – PA)</b>	<b>Média crustal (Taylor &amp; Mclennan, 2001)</b>
<b>SiO<sub>2</sub>(%)</b>	31,61	65,87
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,32	15,19
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	41,39	4,99
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,12	0,17
<b>CaO</b>	0,04	4,20
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,52	0,65
<b>P.F.</b>	10,16	n.a.
<b>V (ppm)</b>	294,38	110
<b>Co</b>	47,37	17
<b>Ni</b>	390,32	50
<b>Cu</b>	120,45	25
<b>Zn</b>	23	71
<b>Ga</b>	27,62	17
<b>As</b>	3,12	1,50
<b>Sr</b>	5,65	350
<b>Y</b>	10,78	22
<b>Zr</b>	370,60	190
<b>Nb</b>	9,37	12,50
<b>Mo</b>	3,50	1,50
<b>Sn</b>	1,92	5,50
<b>Sb</b>	0,10	0,20
<b>Ba</b>	94,38	550
<b>La</b>	7,79	30
<b>Ce</b>	52,24	64
<b>Pr</b>	1,54	7,10
<b>Nd</b>	5,47	26
<b>Sm</b>	1,19	4,50
<b>Eu</b>	0,25	0,88
<b>Gd</b>	1,39	3,80
<b>Tb</b>	0,27	0,64
<b>Dy</b>	1,87	3,50
<b>Ho</b>	0,42	0,80
<b>Er</b>	1,37	2,30
<b>Tm</b>	0,24	0,33
<b>Yb</b>	1,83	2,20
<b>Lu</b>	0,29	0,32
<b>Hf</b>	10,88	5,80
<b>Ta</b>	0,66	1,10
<b>W</b>	9,15	2

Elem.	(conclusão)	
	Média das crostas (Domínio Canaã – PA)	Média crustal (Taylor & McLennan, 2001)
Hg	0,08	n.a.
Pb	32,52	16
Th	20,28	10,70
U	8,75	2,80

Tabela 3- Composição química de rochas lateríticas derivadas, respectivamente, de granitos, basaltos e rocha ultramáfica, evidenciando sua possível correlação entre laterito e rocha fonte.

Elem.	Granito	Basalto	Ultramáfica
SiO <sub>2</sub> (%)	46,20	23,70	3,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,50	24,60	5,49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,30	28,30	67
Na <sub>2</sub> O	-	0,83	0,33
MgO	0,31	1,04	0,77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,32	0,03
K <sub>2</sub> O	0,92	0,30	0,02
CaO	0,16	0,83	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,76	4,27	0,11
V (ppm)	260	682	388
Cr	141	336	26000
Co	6	52	707
Ni	25	155	11400
Cu	23	199	48
Zn	10	143	420
Rb	38	9	4
Y	22	59	8
Zr	387	307	5
Nb	26	35	3
Ce	90	76	15
Th	110	10	6

Fonte: Modificado de Costa (2007).

#### 4.2.1 Elementos maiores e menores

A composição química em amostras totais de crostas lateríticas reforça os dados mineralógicos obtidos, confirmando o predomínio de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e perda de elementos solúveis como CaO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O, que são substituídos por minerais argilosos ricos

em alumínio (Figura 17). Os teores observados na tabela 1 estão relacionados à presença de quartzo, caulinita, hematita + goethita e permitiram agrupar crostas com concentrações semelhantes de elementos maiores.

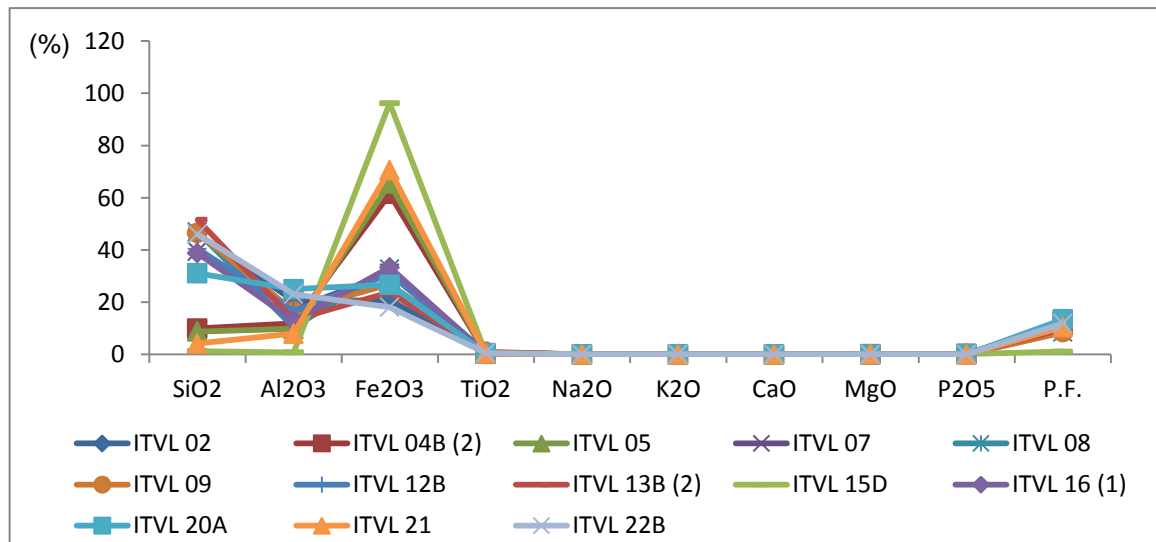


Figura 17- Distribuição de elementos maiores, com o predomínio de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; e perda ao fogo de crostas lateríticas.

Os teores de SiO<sub>2</sub> são dominantes na maioria das amostras, oscilam entre 4,18% e 51,56% (Tabela 1). Ainda nestas amostras, os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variam de 18,06% a 96,19% e demonstra comportamento inverso ao da sílica, padrão notável ao longo da evolução de um perfil laterítico.

Em algumas amostras são notáveis concentrações que diferem da maioria das amostras. As amostras ITVL 04B(2), ITVL 05, ITVL 15D e ITVL 21, apresentam teores de SiO<sub>2</sub> que variam de 1,28% a 9,93% e elevados teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (entre 61,48% e 96,19%).

Os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> estão associados à ocorrência de caulinita e goethita e também mostram a relação entre rocha mãe e crosta. A maioria das crostas estudadas apresentam maiores teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,49% a 25%) quando comparados aos teores das amostras em que os teores de ferro são bem expressivos, em que o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> está em torno de 0,8% a 11,92%.

Os teores de TiO<sub>2</sub> demonstram a neoformação de anatásio, típico do processo intempérico, e também tem relação com a rocha fonte. Seus teores oscilam entre 0,56 ppm e 1,07 ppm, enquanto que foram observados valores menores de TiO<sub>2</sub> para as amostras ITVL

04B(2), ITVL 05, ITVL 15D, ITVL 16(1), ITVL 20A e ITVL 21, com teores entre 0,14 ppm e 0,41 ppm.

A perda ao fogo varia de 1,1% a 13,4%, refletindo à presença de caulinita e goethita. Dentre os álcalis, o  $K_2O$  é o que apresenta teores mais elevados, entre 0,01% a 0,13%. O  $Na_2O$  é o mais baixo (0,01% em todas as amostras analisadas), enquanto que o  $CaO$  (0,01% a 0,08%) acompanha os teores de  $MgO$  (0,01% a 0,07%), mas com teores mais baixos.

#### 4.2.2 Elementos-traço

O padrão de distribuição dos teores de elementos-traço varia bastante entre as crostas, conforme gráfico da figura 18, refletindo a diferenciação mineralógica e química e o enriquecimento em ferro no ambiente intempérico. Essa variação também está associada à diferença de composição química da rocha mãe.

De maneira geral, observa-se que as concentrações médias dos elementos-traço das crostas lateríticas estão abaixo da média crustal (Mn, Zn, Rb, Sr, Y, Nb, Sn, Cs, Ba e Ta) até acima desta média (Co, Ni, Ga, As, Se, Zr, Mo, Cd, Sb, Hf, W, Hg, Pb, Bi, Th e U), por vezes muito acima (V, Cr, Cu).

Costa (2007) descreve que em zonas superiores do perfil, como o horizonte das crostas, os teores de V, Mo e As são elevados, e os elementos Zr, V, W, U, Th estão enriquecidos, geralmente como minerais resistatos. As médias dos teores destes elementos-traço enriquecidos em um perfil laterítico também estão indicadas na tabela 2 e confirmam que, em comparação à média crustal apresentada por Taylor & McLennan (2001), seus teores são elevados.

Além disso, os dados da tabela 3 possibilitaram a relativa comparação entre o comportamento químico das crostas estudadas a concentrações padrões definidas para lateritos derivados de rochas graníticas, basaltos e ultramáficas.

A maioria das amostras, assim como as agrupadas com base nos teores de elementos maiores, apresentam valores próximos a concentrações de lateritos provenientes de rochas graníticas. Entretanto, nas amostras ITVL 04B(2), ITVL 05, ITVL 15D, ITVL 16(1), ITVL 20A e ITVL 21, são comuns a relativa associação entre concentrações mais elevadas de Cr,

Co, Ni; concentrações medianas de V, Cu, Zn; e mais baixos teores de elementos terras raras (especialmente Ce), Y, Zr, Nb e Th, constituindo indicadores de lateritos derivados de rochas intermediárias a básicas.

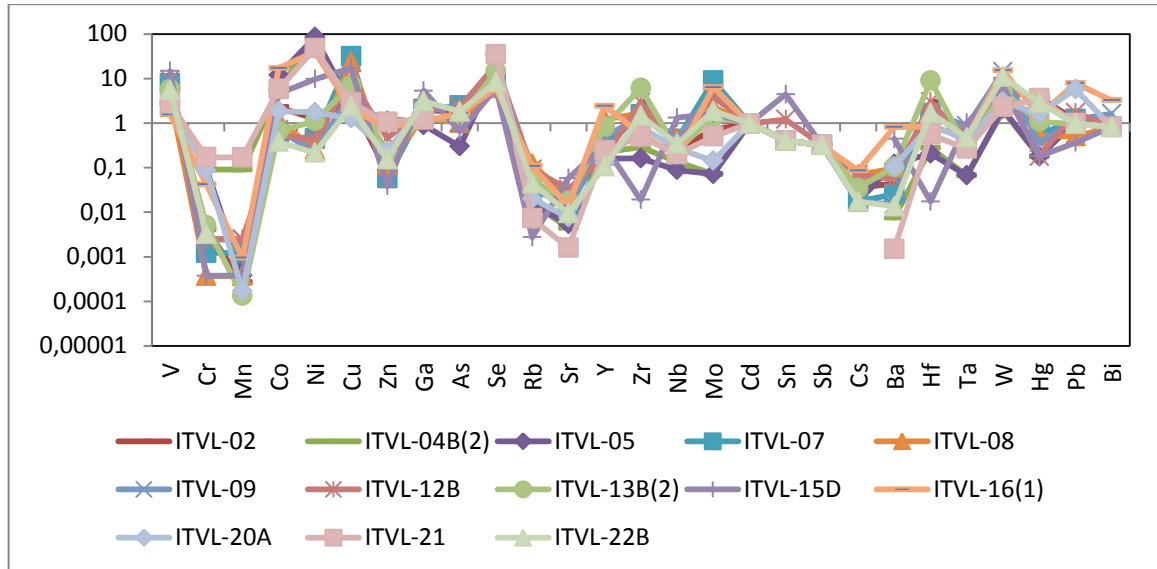


Figura 18- Distribuição de elementos-traço de crostas lateríticas, normalizado pela média crustal de Wedepohl (1995).

O diagrama de dispersão Ti x Zr utilizado por Hallberg (1984) permitiu uma provável distinção do tipo petrográfico da rocha fonte. Na figura 19 estão plotadas as amostras estudadas em seus respectivos campos de influência, classificando-as como crostas possivelmente derivadas de basaltos, andesitos, dacitos e riolitos.

No diagrama abaixo, comprova-se que a grande maioria das amostras estudadas está no campo de riolitos ou dacitos; e que as amostras ITVL 04B(2), ITVL 05, ITVL 15D, ITVL 16(1), ITVL 20A e ITVL 21 coincidiram com a composição de andesitos ou basaltos.

De forma geral, observou-se que amostras derivadas de riolitos e dacitos têm maior teor de Zr e baixos valores de Ti, enquanto que rochas derivadas de rochas intermediárias, como andesitos, têm baixas concentrações de Zr e de Ti. Destaca-se que em rochas máficas, como basaltos, são comuns maiores teores relativos de Ti (Costa 2007), conforme também pode ser observado no diagrama abaixo.

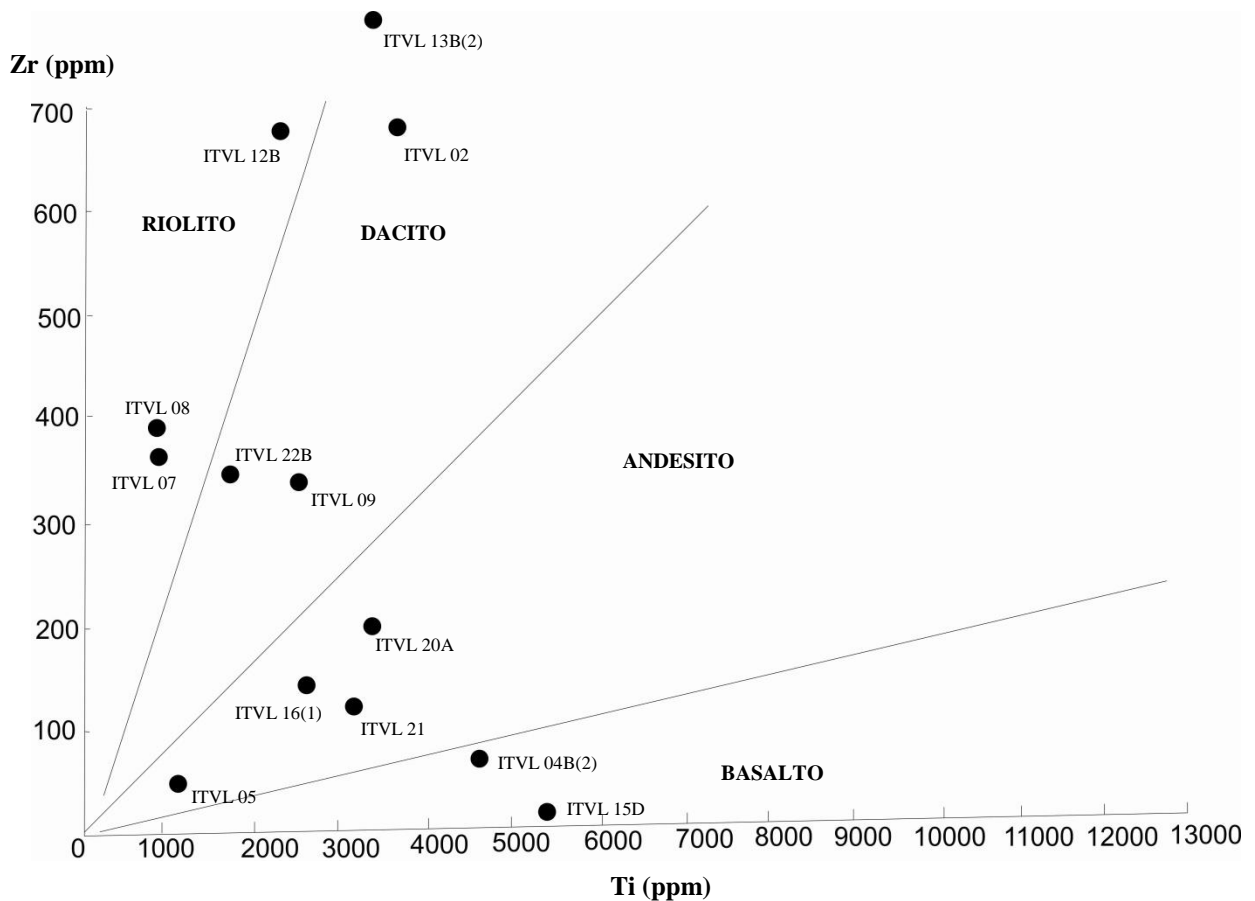


Figura 19- Amostras de crostas plotadas em diagrama de dispersão de Ti x Zr de Hallberg para identificação de provável rocha ígnea fonte.

Fonte: Adaptado de Hallberg (1984).

#### 4.2.3 Elementos terras raras

Os Elementos Terras Raras (ETR) são liberados de minerais primários e mobilizados, com crescente acúmulo em direção ao topo do perfil, e fracionados (Oliveira & Imbernon 1998).

Na tabela 1 também estão indicados os teores de elementos terras raras (ETR). Dentre as amostras estudadas, a ITVL 09 apresenta as menores  $\Sigma$ ETR (14,40 ppm), enquanto a ITVL 12B as maiores  $\Sigma$ ETR (237,35 ppm).

Em consequência da mobilidade diferencial ao longo dos horizontes, os ETR são fracionados, de forma que os elementos terras raras leves (ETRL) são mais abundantes, portanto menos solúveis, nas crostas lateríticas que os elementos terras raras pesados (ETRP), respectivamente com somatórias de 26,94 ppm e 2,55 ppm. La, Ce e Nd são os ETRL mais abundantes, com respectivas  $\Sigma$ ETR 5,20 ppm; 16,70 ppm e 3,40 ppm.

O fracionamento entre ETRL e ETRP pode ser medido pela razão  $(La/Yb)_N$ , demonstrando um empobrecimento em ETRP. O menor fracionamento ocorre na amostra ITVL 09 (0,76), enquanto que na ITVL 15D o fracionamento é maior (12,94).

O fracionamento de ETRL foi medido pela razão  $(La/Sm)_N$ , variando de 1,48 a 7,41. É mais acentuado que o fracionamento de ETRP, medido pela razão  $(Gd/Yb)_N$ , com valor entre 0,21 e 1,22.

Em ambientes intempéricos é comum anomalia negativa de európio, em que o  $Eu^{+3}$  reduz a  $Eu^{+2}$  durante a alteração de rochas, resultando em minerais de argila (L. Zhou *et al.* 2013). Em comparação ao condrito de Taylor & McLennan (1985) as crostas mostram anomalia negativa de Eu relativamente acentuada ( $Eu_N/Eu^*$  entre 0,61 a 1,003). A anomalia do európio nas amostras ITVL 09, ITVL 15D e ITVL 16(1) é muito pequena, respectivamente 0,39; 0,29 e 0,17 (Figura 20).

As crostas apresentam anomalia positiva de Ce, o que é bastante comum em ambientes lateríticos, onde  $Ce^{+3}$  oxida para  $Ce^{+4}$ , que é muito menos solúvel (Costa *et al.* 2014, Oliveira & Imbernon 1998). O valor da anomalia positiva de Ce ( $Ce_N/Ce^*$ ) varia entre 0,51 a 3,94. Nas amostras ITVL 02 e ITVL 20A os valores são maiores, respectivamente 11,81 e 5,43 (Figura 20).

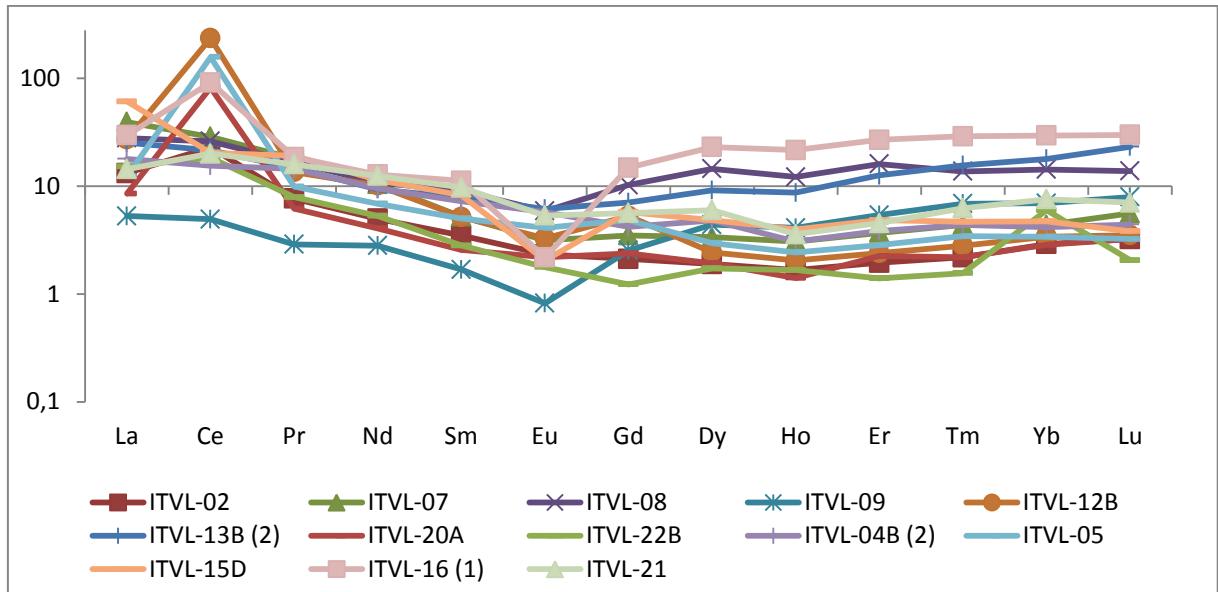


Figura 20- Padrão de distribuição dos ETR's normalizados aos condritos de Taylor & McLennan (1985) nas amostras de crostas lateríticas.

#### 4.3 DIAGRAMAS BINÁRIOS E TERNÁRIOS

A diferença na composição química das crostas investigadas também pode ser observada pelo diagrama ternário  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Figura 21), que foi utilizado para observar a mobilidade nos teores de elementos maiores durante o processo de lateritização.

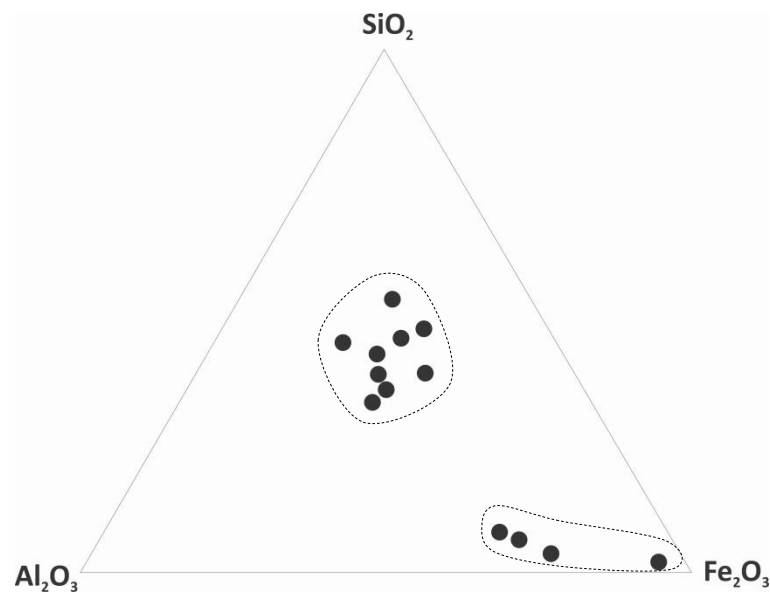


Figura 21- Diagrama ternário que mostra a mobilidade de  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  durante a lateritização, observando-se dois domínios.

Neste diagrama observou-se uma composição essencialmente ferruginosa, sugerindo uma rocha fonte pobre em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e enriquecimento em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  durante o processo intempérico. A partir da distribuição de teores no diagrama, nota-se um domínio com valores medianos de  $\text{SiO}_2$  e outro domínio marcado pela perda gradual de  $\text{SiO}_2$  e maior enriquecimento em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mostrando valores muito baixos a medianos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

As figuras 22 e 23 apresentam diagramas binários de correlação dos principais elementos maiores, em que se demonstra o comportamento e relação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  com o  $\text{SiO}_2$  durante a lateritização. Em cada diagrama também são mostrados seus coeficientes de correlação, que indicam o quanto as variáveis estão associadas.

No diagrama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x  $\text{SiO}_2$  os valores das variáveis estão representados por pontos de dispersão que indicam uma forte correlação linear negativa ( $R^2 = 0,88$ ) e o diagrama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mostra forte correlação linear negativa ( $R^2 = 0,7165$ ).

No diagrama  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a amostra 15D também destaca-se das demais devido o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  muito alto e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  baixo (0,8%), assim como no diagrama  $\text{Al}_2\text{O}_3$  x  $\text{SiO}_2$ .

No diagrama de correlação entre as variáveis  $\text{TiO}_2$  x  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  x  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  x  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  x Zr são notáveis a baixa correlação, sobretudo os valores de titânio acima da média crustal, entre 0,14% a 0,79%, destacando-se a amostra ITVL 09 com teor pouco maior 1,07%.

A forte correlação positiva no diagrama Hf x Zr ( $R^2 = 0,9671$ ) indica que o zircão é o principal detentor de Hf nas crostas, o que se deve a sua estabilidade química.

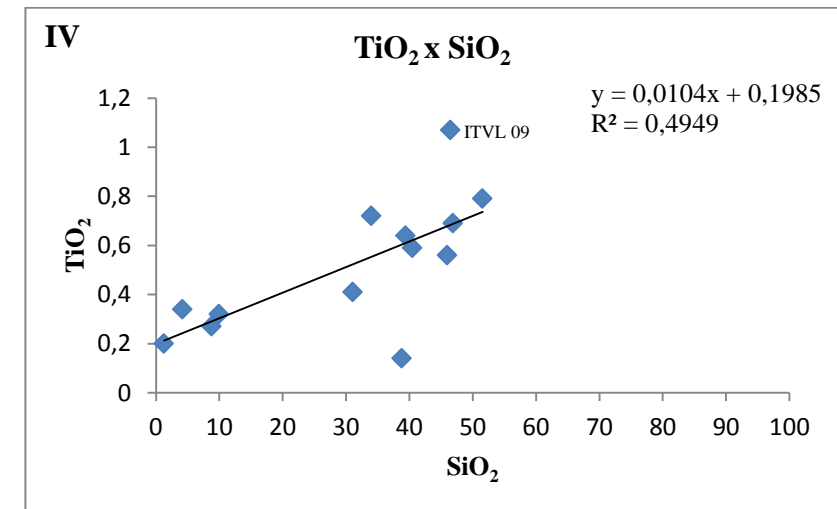
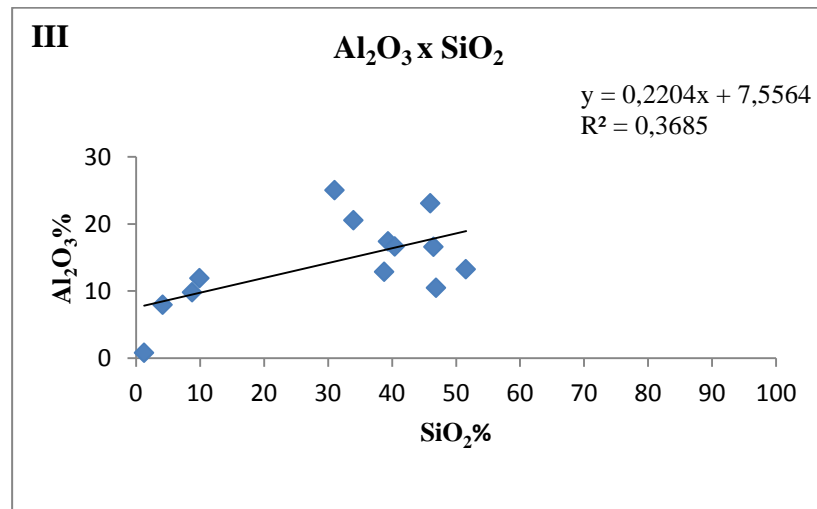
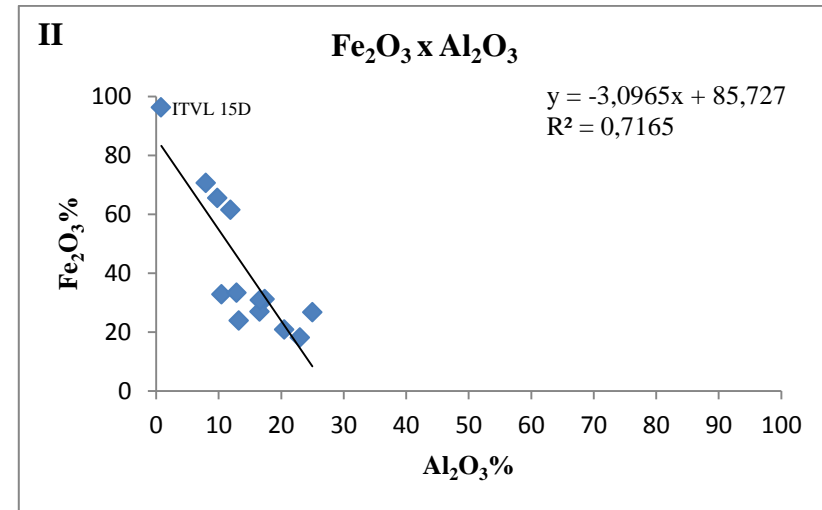
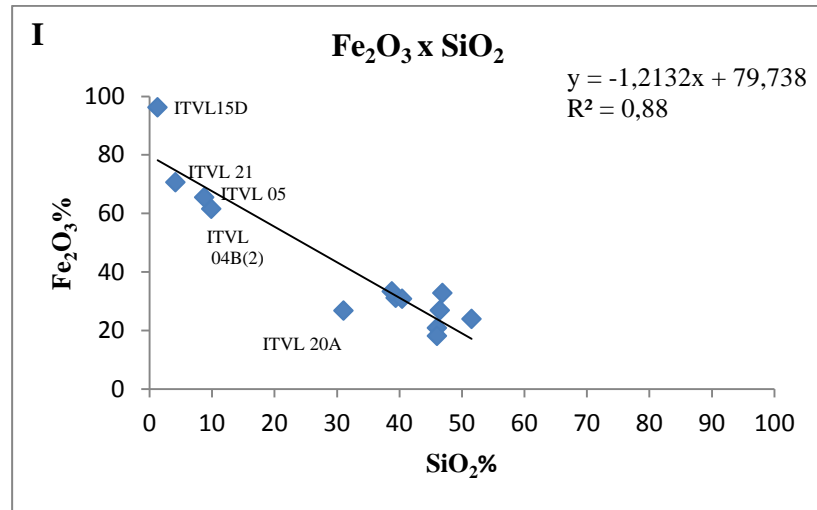


Figura 22- Diagramas binários com suas respectivas retas de regressão linear e coeficiente y, que mostram a relação entre (I)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ , (II)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{Al}_2\text{O}_3$ , (III)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$  e (IV)  $\text{TiO}_2 \times \text{SiO}_2$ .

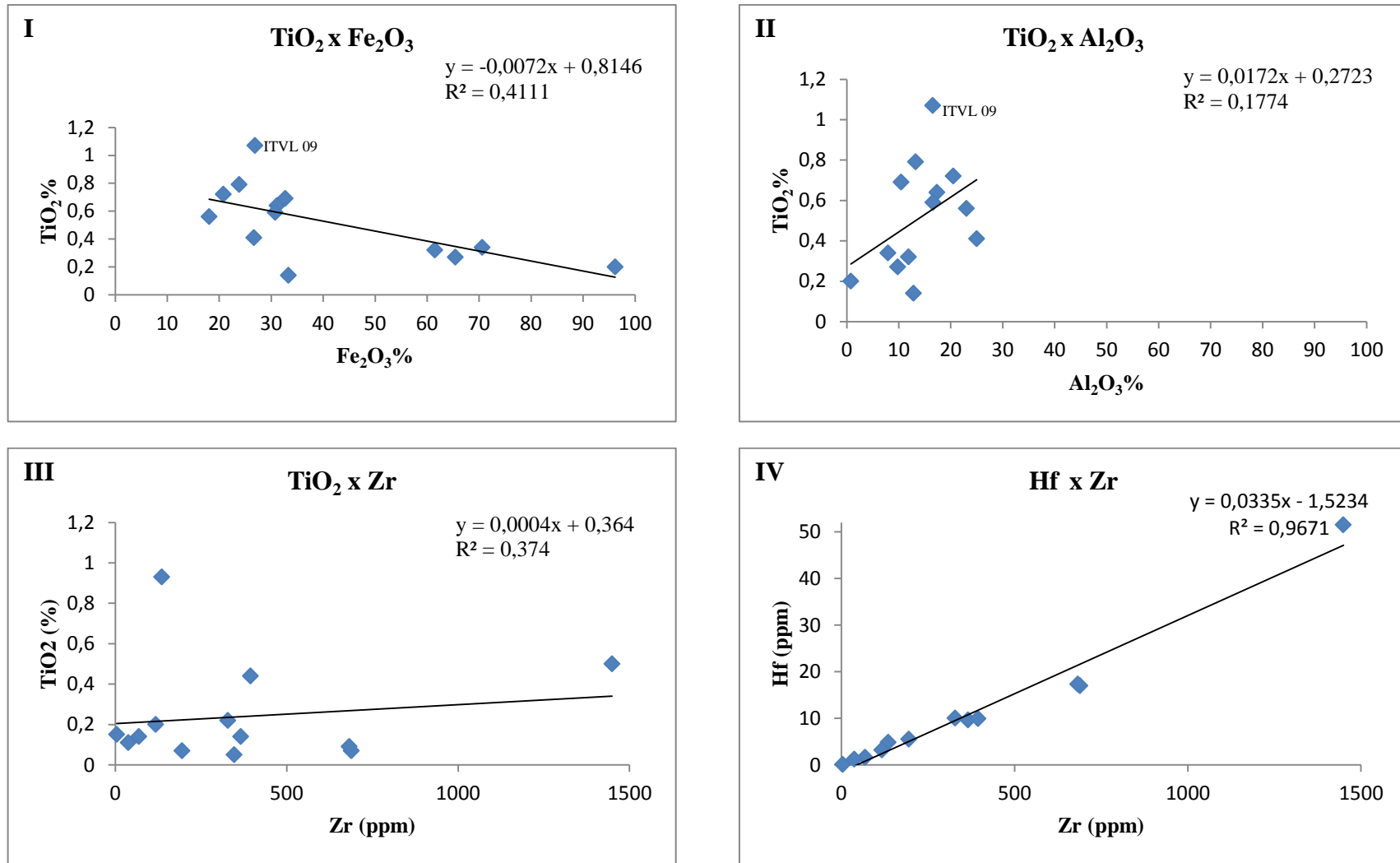


Figura 23- Diagramas binários com suas respectivas retas de regressão linear e coeficiente y, que mostram a relação entre (I) TiO<sub>2</sub> x Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (II) TiO<sub>2</sub> x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (III) TiO<sub>2</sub> x Zr e (IV) Hf x Zr.

## 5 INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL

O processo de formação e posterior desenvolvimento de estruturas e texturas de crostas lateríticas estão associados à fase de lateritização mais recente, que foi retomada durante o Mioceno, com individualização de áreas topograficamente rebaixadas e exposição de rochas devido à contínua erosão durante a sazonalidade climática do Plioceno-Pleistoceno (Horbe 2014), com alternância entre clima tropical úmido e clima semi-árido (curta estação seca com cobertura de savana) (Costa 2007, Horbe & Costa 1999, Kotschoubey *et al.* 2005a).

O clima, o tempo de exposição da rocha, o tipo de rocha implicam na evolução de um perfil laterítico, de forma que a presença de hematita está associada a clima mais seco, enquanto que a presença de caulinita, goethita e/ou quartzo corresponde a um clima úmido (Anand & Paine 2002).

As crostas são formadas pelo endurecimento do horizonte mosqueado em clima seco e suas cavidades são preenchidas por caulinita, goethita e/ou quartzo devido à percolação de água meteórica. Os nódulos e pisólitos ferruginosos observados ao microscópio óptico tem origem associada à remobilização do ferro em condições climáticas úmidas (Anand & Paine 2002, Horbe 2014).

A paisagem dissecada atual foi estabelecida pela degradação parcial de crostas ferruginosas em períodos mais úmidos, que resultou em solos com fragmento de crostas. O solo da área de estudo é classificado como vermelho-amarelo distrófico, caracterizados pela ocorrência em áreas dissecadas e pela pequena espessura, o que evidencia processo recente (Costa 2007, Horbe 2014, Horbe & Costa 1999, Kotschoubey *et al.* 2005a, Schellmann 1994).

## 6 CONCLUSÕES

As crostas lateríticas do Domínio Canaã são maciças a pouco porosas e porosas. Ao microscópio óptico exibem o arcabouço hematítico-goethítico, por vezes com nódulos, pisólitos, fragmentos de quartzo fraturados e/ou corroídos.

Mineralogicamente refletem uma composição característica de perfis lateríticos ferruginosos, dominados por hematita, goethita, quartzo e caulinita. Esses minerais foram parcialmente identificados por microscopia óptica e MEV/EDS, e principalmente por DRX. Estas análises foram complementadas por FTIR, que indicam bandas funcionais de estiramento, agrupando-se as amostras em (I) crostas com picos equivalentes de hematita e goethita, (II) crostas goethíticas-hematíticas e (III) crostas com picos dominantes de hematita.

O comportamento térmico mostrou dois picos endotérmicos provavelmente associados à decomposição da goethita com formação de hematita e à dehidroxilação da caulinita, e um pico exotérmico atribuído à provável formação da mulita.

A composição química reforça os dados mineralógicos, confirmando o domínio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e PF. A análise do padrão de teores de elementos maiores e menores, elementos-traço e terras raras permitiram caracterizar a maioria das crostas como derivadas de rochas félsicas (ácidas), enquanto que algumas foram caracterizadas como provenientes de rochas máficas (intermediárias a básicas).

Os aspectos texturais macro- e microscópicos, micromorfológicos, mineralógicos e químicos destas formações lateríticas contribuem para a interpretação paleoclimática em decorrência de sua origem estar associada a processos de lixiviação em ambiente de percolação, com dissolução de minerais primários e formação de caulinita, goethita e hematita. Por sua composição química e mineral, as crostas lateríticas investigadas são compatíveis com perfis lateríticos imaturos.

## REFERÊNCIAS

- Anand R.R. & Paine M. 2002. Regolith geology of the Yilgarn Craton, Western Australia: implications for exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49: 3-162.
- Araújo O.J.B. 1991. Geologia estrutural. In: Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. *Serra dos Carajás Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto recursos minerais*. Brasília, DF, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, em convênio com o Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM. Parte II, Cap. 2, p. 51-60. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N, João M.X.S.J. Aspectos gerais. 1991. In: Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. *Serra dos Carajás Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto recursos minerais*. Brasília, DF, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, em convênio com o Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM. Parte I, Cap. 1, p. 3-10. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- Bardossy G. & Aleva G.J.J. 1990. *Lateritic bauxites*. Amsterdam, Elsevier. 624p. (Developments in Economic Geology, 27).
- Bignelli P.A., Paradella W.R., Morais M.C., Sant’Anna M.V. 1998. Avaliação da potencialidade de discriminação de subunidades litológicas do Complexo Xingu na região de Salobo, Província Mineral de Carajás, Brasil; através de imagens de radar de abertura sintética. In: 9º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil. *Anais...* Santos, INPE, p. 371-381.
- Cavalcante N.G.S., Medina A.C.Q.D., Pontes D.L., Brito A.C.F. 2014. Estudo de modificação da quitosana com orto-vanilina. In: 37ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. *Resumos...* Natal-RN, Sociedade Brasileira de Química- SBQ. Disponível em: <<http://www.s bq.org.br/37ra/cdrom/resumos/T0776-1.pdf>>. Acesso em: 30 novembro de 2016.
- Coelho M.R., Santos H.G., Silva E.F., Aglio M.L.D. 2002. O recurso natural solo. In: Manzatto C.V., Freitas Jr. E.F, Peres J.R.R. *Uso agrícola de solos brasileiros*. Rio de Janeiro, Embrapa solos, p. 1-11.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21 (2): 146-160, jun.
- Costa M.L. 1997. Lateritisation as a major process of ore deposit formation in the amazon region. *Explor. Mining Geol.*, 6 (1): 79-104.
- Costa M.L., Carmo M.S., Behling H. 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 35 (2): 165-176, jun.

Costa M.L. 2007. Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização. *In*: Licht O., Mello C.S.B, Silva C.R. *Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica – SBGq / CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p. 199–244.

Costa M.L, Cruz G.S., Almeida H.D.F., Poellmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: evidence of genetic relationships. *Journal of Geochemical Exploration*, **146**: 58-74.

Coutinho M.G.N. 2008. *Geologia do Cráton Amazônico*. [S.l.], CPRM – Serviço Geológico do Brasil, cap. 2, p. 13-32.

Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Canaã metallogenic province, Eastern Amazonian craton, Brazil. *In*: Symposium on Magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian Craton. *Abstracts Volume and Field Trips Guide*. Belém, PRONEX-UFPA/SBG-NO, p. 99-150.

Delvigne J.E. 1999. Atlas of micromorphology of mineral alteration and weathering. 3 ed. *Mineralogical Association of Canada (in collaboration with ORSTOM, Paris)*, Ottawa, Ontario.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. Centro Nacional de Pesquisa de solos, 306p.

Fabre S., Nédélec A., Poitrasson F., Strauss H., Thomazo C., Nogueira A. 2011. Iron and sulfur isotopes from the Carajás mining province (Pará, Brazil): implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the archaean-proterozoic transition. *Chemical Geology*, **289**: 124-139.

Feio G.R.L., Dall’Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., Soares J.E.B. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **227**: 157–185.

Freyssinet Ph., Butt C.R.M., Morris R.C. 2005. Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Econ. Geol.* 100th Anniversary: 681-722.

Fungaro D.A. & Borrely S.I. 2010. Síntese e caracterização de material zeolítico de cinzas de carvão modificado por surfactante. *In*: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Campos do Jordão, SP, Brasil. [Anais...]. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2010/eventos/cbecimat/15859.pdf>> Acesso em:

Hallberg J.A. 1984. A geochemical aid to igneous rock identification in deeply weathered terrain. *Journal of Geochemical Exploration*, **20**:1-8.

Horbe A.M.C. 1995. *Evolução mineralógica e geoquímica multi-elementar de perfis de solos sobre lateritos e gossans na Amazônia*. TS Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 213p.

Horbe A.M.C. & Costa M.L. 1999. Genetic relationship between lateritic duricrusts and soils in the Amazonian region - Brazil. *In: Intern. Geochem. Expl. Symp., Vancouver, Abstracts Volume*, p. 123-124.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2006. *Mapa de unidades de relevo do Brasil*. 2ª ed. Belém. Escala: 1:5.000.000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2008. *Pedologia. Mapa esquemático de solos do Estado do Pará*. 1. ed. Belém. Escala: 1:1.800.000.

João X.S.J. 2013. Arcabouço geológico-tectônico e implicações metalogenéticas. *In: João X.S.J., Teixeira S.G., Fonseca D.D.F. Geodiversidade do Estado do Pará. Levantamento da geodiversidade*. Belém, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, p. 17-21. (Programa Geologia do Brasil).

Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.A.S., Azevedo C.H.D. 2005a. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da província de bauxitífera de Paragominas, Noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará/Oeste do Maranhão. *In: Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*, cap. XI, p. 691-777.

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Calaf J.M.C. 2005b. Evolução geológica da porção meridional da província de bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (noroeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará e extremo oeste do Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **35** (2): 263-272, junho.

Martinello P. 2014. *Obtenção de caulinita intercalada com acetato de potássio via processos mecanoquímicos e imersão em solução*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em tecnologia de processos químicos e bioquímicos, Universidade Federal do Paraná, Campus Pato Branco, 56p.

Martins R.A. 2000. *Fósseis de vegetais da Formação Pedra de Fogo: aspectos taxonômicos, mineralogia e composição química*. DS Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 92p.

Mercury J.M.R., Galdino L.G., Vasconcelos N.S.L.S., Paiva A.E.M, Cabral A.A., Angélica R.S. 2010. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. *Revista Matéria*, **15** (3): 445-460.

Oliveira S.M.B. & Imbernon R.A.L. 1998. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **11** (4): 379-388.

Pereira A.R.P., Silva M.J.S.F., Oliveira J.A.S. 2007. Análise química de pigmentos minerais naturais de Itabirito (MG). *Cerâmica*, **53**: 35-41.

- Ragassi M.V. & Parabocz C.R.B. 2014. Caracterização da caulinita intercalada com fosfato de potássio dibásico. *In: SBQ 37º Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. [Anais...] Trabalho MAT153.*
- Salama W., Aref M.E., Gaupp R. 2015. Spectroscopic characterization of iron ores formed in different geological environments using FTIR, XPS, Mössbauer spectroscopy and thermoanalyses. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, p. 1816-1826.
- Santos H.S., Santos P.S., Kiyohara P. 2006. Estudo por microscopia eletrônica das transformações durante a queima de argilas altamente aluminosas brasileiras. *Cerâmica* **52** : 125-137.
- Santos J.O.S., Hartmann H.E.G., Groves D.I., Mcnaughton N.J., Fletcher I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, **3** (4): 453-488.
- Schellmann W. 1986. On the geochemistry of laterites. *Chemie der Erde*, **45**: 39-52.
- Schellmann W. 1994. Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation. *Catena*, **21**: 131-143.
- Schwarz M.R. 2010. *Depósito de cobre e zinco de Pojuca corpo quatro, mineralização do tipo VMS na Província Mineral de Carajás*. DS Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 80p.
- Sousa F.D.S.S. 2007. *Estudo da alteração hidrotermal, com ênfase no metassomatismo sódico, de rochas granitoides e máficas da região de Canaã de Carajás, Província Mineral do Pará*. DS Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 196p.
- Spier C.A., Vasconcelos P.M., Oliviera S.M.B. 2006. 40Ar/39Ar geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chemical Geology*, **234**: 79-104. (Minerações Brasileiras Reunidas-MBR).
- Tardy Y., Kobilsek B., Paquet H. 1991. 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*, **12** (1/2): 283-295.
- Taylor S.R. & McLennan S.M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford, Blackwell Scientific Publication, 312p.
- Taylor S.R. & McLennan S.M. 2001. *Chemical composition and element distribution in the earth's crust*. New York, Academic Press, v. 2, p. 697-719.
- United States Geological Survey (USGS). 2017. *Earth explorer*. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 07 janeiro de 2017.

Vasquez M.L., Sousa C.S., Carvalho J.M.A. (orgs.). 2008. *Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Pará, escala 1:1.000.000*. Integração, atualização e difusão de dados da Geologia do Brasil. Mapas Geológicos Estaduais. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém. (Programa Geologia do Brasil - PGB).

Yamaura M., Oliveira F.A., Yamamura A.P.G. 2005. Preparação de carregador magnético quelante para uso na remoção de radionuclídeos. *In: ABEN, 2º International Nuclear Atlantic Conference – INAC, 2., 2005, Santos, SP, Brazil. [Anais...]*, Associação Brasileira de Energia Nuclear–ABEN, Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/1970.pdf>>. Acesso em: 02 outubro de 2017.

Zhou L., Zhang Z., Li Y., You F., Wu C., Zheng C. 2013. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **73**: 184-198.