



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 621**

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE U, TH, ETR E OUTROS  
ELEMENTOS-TRAÇO EM BAUXITAS DA REGIÃO DE  
PARAGOMINAS, NE DO PARÁ**

**Dissertação apresentada por:**

**BRENO MARCELO RIBEIRO PARAENSE**

**Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA)**

---

**Belém - PA  
2022**

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

P221m Paraense, Breno Marcelo Ribeiro.

Mineralogia e Geoquímica de U, Th, ETR e outros elementos-traço em bauxitas da região de Paragominas, NE do Pará / Breno Marcelo Ribeiro Paraense. — 2022.  
xiii, 45 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2022.

1. Bauxita. 2. Terras-Raras. 3. Geoquímica. 4. Elementos-Traços. I. Título.

CDD 551.9

---

Dedico à memória de meu pai.

---

A Deus, a minha família, a minha  
esposa Maria de Lourdes, aos  
meus companheiros de jornada  
científica e a todos aqueles que  
tornaram a realização deste  
trabalho possível.



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE U, TH, ETR E OUTROS  
ELEMENTOS-TRAÇO EM BAUXITAS DA REGIÃO DE  
PARAGOMINAS, NE DO PARÁ**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:

**BRENO MARCELO RIBEIRO PARAENSE**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA, linha de pesquisa MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**

**Data de Aprovação: 17/08/2022.**

Banca Examinadora:

  
Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Orientador – UFPA

  
Prof.ª Dr.ª Adriana Maria Coimbra Horbe  
Membro – UnB

  
Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa  
Membro – UFPA

## AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus pais, pela dádiva da vida;

A minha esposa Maria de Lourdes, pelo apoio e estímulo;

Aos meus companheiros, pelo compartilhamento de experiências e perspectivas;

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Rômulo Angélica, pela oportunidade propiciada e conhecimento transmitido;

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Daniel José Lima de Sousa e ao Dr. Gabriel Negreiros Salomão, pelos apontamentos, discussões e incentivo;

À Norsk Hydro, pelo financiamento para a realização deste trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará e ao Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho.

A todos que, contribuíram direta e indiretamente para a concretização desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O estado do Pará apresenta os maiores depósitos de bauxita metalúrgica do Brasil, com destaque para as regiões Oeste (municípios de Oriximiná e Juruti, com duas minas em operação) e Nordeste do estado (municípios de Paragominas – uma mina em operação – e Rondon do Pará). A cobertura laterítica/bauxítica da província bauxitífera de Paragominas é produto do intemperismo extremo de rochas sedimentares siliciclásticas e compõe-se de minerais resultantes do mais alto grau de alteração ou seja, de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), goethita ( $\text{FeOOH}$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), aos quais acrescentam-se traços de quartzo reliquiar, mica fortemente degradada e minerais pesados de maior resistência nas condições tropicais úmidas tais como rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), turmalina e zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Além da extração de bauxita, merece destaque a sua transformação mineral, que acontece no distrito industrial de Barcarena, próximo a Belém, com a refinaria de Alumina da Hydro-Alunorte, e a produção de alumínio metálico pela Albrás. Devido a acontecimentos recentes relacionados à disposição de resíduos em bacias de decantação (DRS) utilizadas pela mineradora, instaurou-se um clima de desconfiança por parte da opinião pública quanto à segurança das populações que habitam nas adjacências da empresa, especialmente no que tange a questão de saúde humana, pois a constituição dos resíduos da transformação mineral do minério não é completamente conhecida. O objetivo desta pesquisa é determinar a presença e estudar o comportamento geoquímico de elementos-traço como U, Th e ETR, além de outros metais pesados, como Hg, Cd e Pb, em bauxitas e coberturas lateríticas da mina Miltônia, em Paragominas, e resíduos (lamas vermelhas) de Barcarena, a relação com a mineralogia acessória desses materiais e estabelecimento de valores de referência ou de background para avaliação ambiental. O presente trabalho foi realizado com amostras provenientes de 1 perfil bauxítico (seção HIJ-231), situados na mina Miltônia 3, coletadas por meio de furos de sondagem e/ou de frente de lavra, também foram coletadas amostras de processo do moinho SAG da usina I, separadas em diferentes frações granulométricas, fornecidas pela empresa Norsk Hydro. Os processos analíticos de DRX e FRX foram realizados no Laboratório de Caracterização Mineral da UFPA (LCM/UFPA), enquanto a etapa de MEV foi efetuada no Laboratório de Microanálises da mesma Unidade/Instituição. Os resultados das análises químicas e mineralógicas das amostras provenientes da mina Miltônia 3, tanto da bauxita in natura, como das suas frações granulométricas, após moagem autógena, demonstraram existir relação entre os altos valores de  $\text{ZrO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  verificados e os minerais acessórios – zircão, rutilo e anatásio.

**Palavras-chave:** bauxita; terras-raras; geoquímica; elementos-traços; Paragominas-Pa.

## ABSTRACT

The state of Pará has the largest deposits of metallurgical bauxite in Brazil, with emphasis on the western regions (municipalities of Oriximiná and Juruti, with two mines in operation) and Northeast regions of the state (municipalities of Paragominas – one mine in operation – and Rondon do Pará). The lateritic/bauxitic cover of the bauxite province of Paragominas is a product of extreme weathering of siliciclastic sedimentary rocks and is composed of minerals resulting from the highest degree of alteration, that is, kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), goethite ( $\text{FeOOH}$ ), hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) and anatase ( $\text{TiO}_2$ ), to which are added traces of relict quartz, traces of heavily degraded mica and heavy minerals of greater resistance in humid tropical conditions such as rutile ( $\text{TiO}_2$ ), tourmaline and zircon ( $\text{ZrSiO}_4$ ). In addition to the extraction of bauxite, its mineral transformation, which takes place in the industrial district of Barcarena, near Belém, with the Hydro-Alunorte Alumina refinery, and the production of metallic aluminum by Albras. Due to recent events related to the disposal of waste in decantation basins (DRS) used by the mining company, a climate of distrust on the part of public opinion regarding the safety of the mining populations that live in the vicinity of the company, especially regarding the issue of human health, since the constitution of residues from the mineral transformation of the ore is not completely known. The objective of this research is to determine the presence and study the geochemical behavior of trace elements such as U, Th and ETR, in addition to other heavy metals, such as Hg, Cd and Pb, in bauxites and lateritic covers from the Miltônia mine, in Paragominas, and residues (red muds) from Barcarena, the relationship with the accessory mineralogy of these materials and establishment of reference or background values for environmental assessment. The present work was carried out with samples from 1 bauxite profile (section HIJ-231), located in the Miltônia 3 mine, collected through drilling holes and/or from the mine front, process samples were also collected from the SAG mill of the plant I, separated into different granulometric fractions, supplied by Norsk Hydro. The XRD and XRF analytical processes were carried out at the Mineral Characterization Laboratory (LCM) from UFPA, while the Scanning Electronic Microscopy stage was carried out at the Microanalysis Laboratory of same Unit/Institution. The results of chemical and mineralogical analyzes of samples from the Miltônia 3 mine, both raw bauxite and its granulometric fractions, after autogenous milling, showed a relationship between the high values of  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  verified and the accessory minerals - zircon, rutile and anatase.

**Keywords:** bauxite; earth-rare elements; geochemistry; trace-elements; Paragominas-Pa.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da Área de Estudo.....	4
Figura 2 – Mapa de localização e geologia da região de Paragominas.....	5
Figura 3 – Localização da bacia de São Luís-Grajaú na região meio-norte do Brasil.....	6
Figura 4 – Bacias Fanerozóicas do Estado do Pará.....	7
Figura 5 – Quadro estratigráfico da Bacia do Grajaú.....	8
Figura 6 – Desenho esquemático do perfil bauxítico.....	12
Figura 7 – Correlação entre os perfis definido pela empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA).....	13
Figura 8 – Correlação entre as nomenclaturas definidas para cada horizonte segundo os referidos autores.....	14
Figura 9 – Mineralogia da Bauxita.....	15
Figura 10 – Análise gráfica dos Teores médios de elementos-traço nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional.....	17
Figura 11 – Análise gráfica dos Teores médios de ETR nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional.....	18
Figura 12 – Fluxograma das amostras de processo e frações granulométricas.....	21
Figura 13 – Mapa de localização dos furos de sondagem e Perfil com a malha de sondagem 25m x 25m na Mina Miltônia 3.....	22
Figura 14 – Seção HIJ-231, malha de sondagem 25x25m.....	22
Figura 15 – Resumo da proveniência/disponibilidade dos materiais e planejamento de análises.....	23
Figura 16 – Fluxograma de etapas da caracterização química e mineral.....	27
Figura 17 – Teores químicos da análise FRX das amostras de processos unitários.....	29
Figura 18 – DRX da amostra 06140246, com destaque para o acúmulo do zircão.....	30

Figura 19 – Distribuição de U, Th e Zr no perfil bauxítico de Miltônia 3.....	31
Figura 20 – Análise gráfica dos Teores médios de elementos maiores nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3. ....	33
Figura 21 – Análise gráfica dos Teores médios de elementos traços nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3.....	35
Figura 22 – Figura 22 – Teores médios de elementos terras-raras (ETR) nos diferentes horizontes da mina Miltônia 3. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coluna litoestratigráfica integrada da Bacia do Grajaú e da Plataforma Bragantina.....	11
Tabela 2 – Comparativo de análises multielementares segmentado por conjunto de furos da Seção HIJ-231.....	24
Tabela 3 – Frações granulométricas da amostra de bauxita da alimentação do moinho SAG da Usina I, após a etapa de britagem.....	28
Tabela 4 – Teores médios de elementos maiores nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3.....	32
Tabela 5 – Teores médios (ppm) de elementos-traço e ETR nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3.....	34
Tabela 6 – Análise de Correlação dos Teores médios de elementos traços nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3.....	37

**LISTA DE ABREVIACOES**

ALA	Alumina Aproveitável
ARV	Argila Variegada
BA	Bauxita Amorfa
BCBA	Bauxita cristalizada-bauxita amorfa
BC	Bauxita Cristalizada
BN	Bauxita Nodular
BNC	Bauxita Nodular Cristalizada
CAP	Capeamento Argiloso
DRX	Difracção de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Energia Eletrônica
ETR <sub>P</sub> , ETR <sub>L</sub>	Elementos Terras-Raras (Pesados, Leves)
FRX	Fluorescência de Raios- X
FWHM	Full Width at Half Maximum
Gbs	Gibbsita
Gt	Goethita Aluminosa
Hem	Hematita
ICCD	Internacional Center for Diffraction Data
ICP-MS	Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Atmica com Plasma Acoplado Indutivamente
Kln	Caulinita
LF	Laterita Ferruginosa
MEV	Microscópio Eletrnico de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MPSA	Mineração Paragominas S. A.
PPC	Perda por calcinação
Rt	Rutilo
SIRE	Sílica Reativa
UFPA	Universidade Federal do Pará

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b> .....	3
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
<b>2.1.1 Bacia de São Luís - Grajaú</b> .....	6
<b>2.1.2 Plataforma Bragantina</b> .....	9
2.2 DESCRIÇÃO DO PERFIL BAUXÍTICO NO PLATÔ DA MINA MILTÔNIA 3.....	12
2.3 MINERALOGIA DA BAUXITA.....	14
<b>2.3.1 Elementos-Traço</b> .....	16
<b>2.3.2 Elementos Terras-Raras (ETR)</b> .....	18
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	19
3.1 MATERIAIS.....	19
3.2 MÉTODOS.....	25
<b>3.2.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy – EDS)   MEV–EDS</b> .....	25
<b>3.2.2 Difratomia de Raio-X (DRX)</b> .....	25
<b>3.2.3 Espectrometria e Fluorescência de Raio-X (FRX)</b> .....	26
<b>3.2.4 Tratamento dos dados – Índices de Intemperismo Químico</b> .....	26
<b>4 RESULTADOS</b> .....	28
4.1 MINERALOGIA.....	28
<b>4.1.1 Análises químicas</b> .....	28
<b>4.1.2 Difração e fluorescência de Raios-X – DRX e FRX</b> .....	29
4.2 DISTRIBUIÇÃO DE U, Th E Zr NO PERFIL BAUXÍTICO DE MILTÔNIA 3.....	31
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	38

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39
APÊNDICE A – TEORES MÉDIOS DE ÓXIDOS MAIORES, ELEMENTOS- TRAÇO E ETRP,L.....	42
APÊNDICE B – MICROGRAFIAS MEV-EDS.....	45

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO

O estado do Pará apresenta os maiores depósitos de bauxita metalúrgica do Brasil, com destaque para as regiões Oeste (municípios de Oriximiná e Juruti, com duas minas em operação) e Nordeste do estado (municípios de Paragominas – uma mina em operação – e Rondon do Pará). Além da extração de bauxita, merece destaque a sua transformação mineral, que acontece no distrito industrial de Barcarena, próximo a Belém, com a refinaria de Alumina da Hydro-Alunorte, e a produção de alumínio metálico pela Albrás. A Alunorte é, atualmente, a maior refinaria de alumina do mundo, fora da China, com capacidade nominal de produção de aproximadamente 6,3 milhões de ton./ano (Hydro-Alunorte 2022).

A bauxita processada é proveniente de duas minas: da Mineração Rio do Norte (MRN), em Porto Trombetas, Oriximiná, e da Mina de Miltônia, Paragominas, pertencente a Hydro (MPSA, Mineração Paragominas S.A.). Nas duas regiões, diferentes trabalhos acadêmicos têm sido desenvolvidos sobre os depósitos de bauxita, especialmente aqueles ligados à sua composição mineralógica e química, além de aspectos da gênese e evolução dos perfis laterítico-bauxíticos (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Costa, 1991; Kotschoubey *et al.*, 1997; Horbe & Costa, 1999; Kotschoubey *et al.*, 2005; Oliveira, 2011, dentre outros).

Na região de Barcarena, na área industrial da Alunorte, os resíduos do processamento da bauxita, conhecidos como Lama Vermelha, são depositados em bacias de decantação, seguindo rigorosos critérios de construção, disposição dos rejeitos e monitoramento desses tanques. Em fevereiro de 2018, após intensas chuvas na região, foram noticiados pela imprensa, transbordamentos dessas bacias de rejeitos, com a dispersão de resíduos para a rede de drenagem do entorno, prejudicando a população local que utiliza os mananciais hídricos para consumo ou para a pesca de subsistência (Mendes 2018). Técnicos do Instituto Evandro Chagas (IEC), que já atuam na região há muitos anos, em trabalhos de avaliação ambiental e humana, atestaram a presença de metais pesados (sic), como Pb, Cd e Hg, e que os mesmos seriam provenientes dos resíduos que transbordaram das bacias. Isso levou o Ministério Público do Estado a ajuizar ação cautelar criminal, levando o juiz de Barcarena a conceder liminar determinando o bloqueio de 50% das operações da Hydro, incluindo a paralisação da bacia DRS2, na intenção de que tal medida implicaria na redução da produção de resíduos e assim diminuir a possibilidade de um novo evento de transbordamento das bacias.

Em maio de 2018, a Associação dos Caboclos, Indígenas e Quilombolas da Amazônia (Cainquiama) deu entrada na Justiça Federal de Paragominas – uma ação civil pública pedindo a imediata paralisação das atividades de exploração de bauxita da mina Miltônia, alegando a presença de “agentes tóxicos altamente prejudiciais à saúde e até cancerígenos, como o Pb, Cr e Ni, e elementos radioativos contidos na bauxita, como U e Th.

No primeiro caso, das bacias de rejeito em Barcarena, a detecção dos metais pesados foi feita através da coleta de amostras e análises químicas realizadas pelo IEC, enquanto no segundo, a denúncia foi feita com base em resultados de trabalho científico realizado por pesquisadores de Instituto de Geociências da UFPA e publicado por Kotschoubey (2005). Nas duas situações, observa-se um total desconhecimento de fundamentos químicos e mineralógicos básicos, tanto da natureza geológica do minério, como do processamento mineral. Adicionalmente, é fato muito grave – e tem que ser fortemente rechaçado pela comunidade acadêmica – a utilização de dados científicos – no caso, resultados de análises químicas de materiais geológicos, de publicações científicas – de modo tendencioso.

Dessa maneira, associado ao longo tempo de trabalhos de pesquisa sobre os materiais supergênicos na Amazônia, e em especial, nos casos anteriormente relatados, não somente os depósitos e a exploração de bauxita, mas também de caulim, relacionados geologicamente, é fundamental retomar os trabalhos nesta área, de modo a investigar a mineralogia acessória de caulins e bauxitas da região, sua química mineral, desde os minérios, até os produtos de transformação e resíduos, além de estabelecer valores de referência ou de background que deem subsídios a estudos ambientais.

## 1.2 OBJETIVOS

Avaliar a presença de elementos-traço como U, Th, ETR, além de outros metais pesados, como Hg, Cd e Pb, em bauxitas e coberturas lateríticas da mina Miltônia, em Paragominas, e resíduos (lamas vermelhas) de Barcarena, sua relação com a mineralogia acessória desses materiais e estabelecimento de valores de referência ou de background para avaliação ambiental.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- ▶ Determinação da constituição química nas diferentes frações granulométricas nas várias etapas do processamento mineral.
- ▶ Estabelecimento da relação entre os elementos-traço e a mineralogia acessória.
- ▶ Contribuir para o estabelecimento de valores de referência ou de background de elementos-traço presentes em materiais supergênicos e resíduos minerais provenientes do processamento da bauxita.

### 1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado com amostras de bauxita provenientes da Mina Miltônia 3, localizada em Paragominas (figura 1), região pertencente à Formação Ipixuna, constituída principalmente de intercalações arenosas - arenito fino/grosso, siltito e argilito com lentes de conglomerado (CPRM); em relação ao solo, é predominante na região o tipo Latossolo Amarelo Distrófico (IBGE); quanto ao Domínio Tectono-Estrutural, a área está inserida na porção noroeste da Bacia São Luís-Grajaú e na porção sul da Plataforma Bragantina.

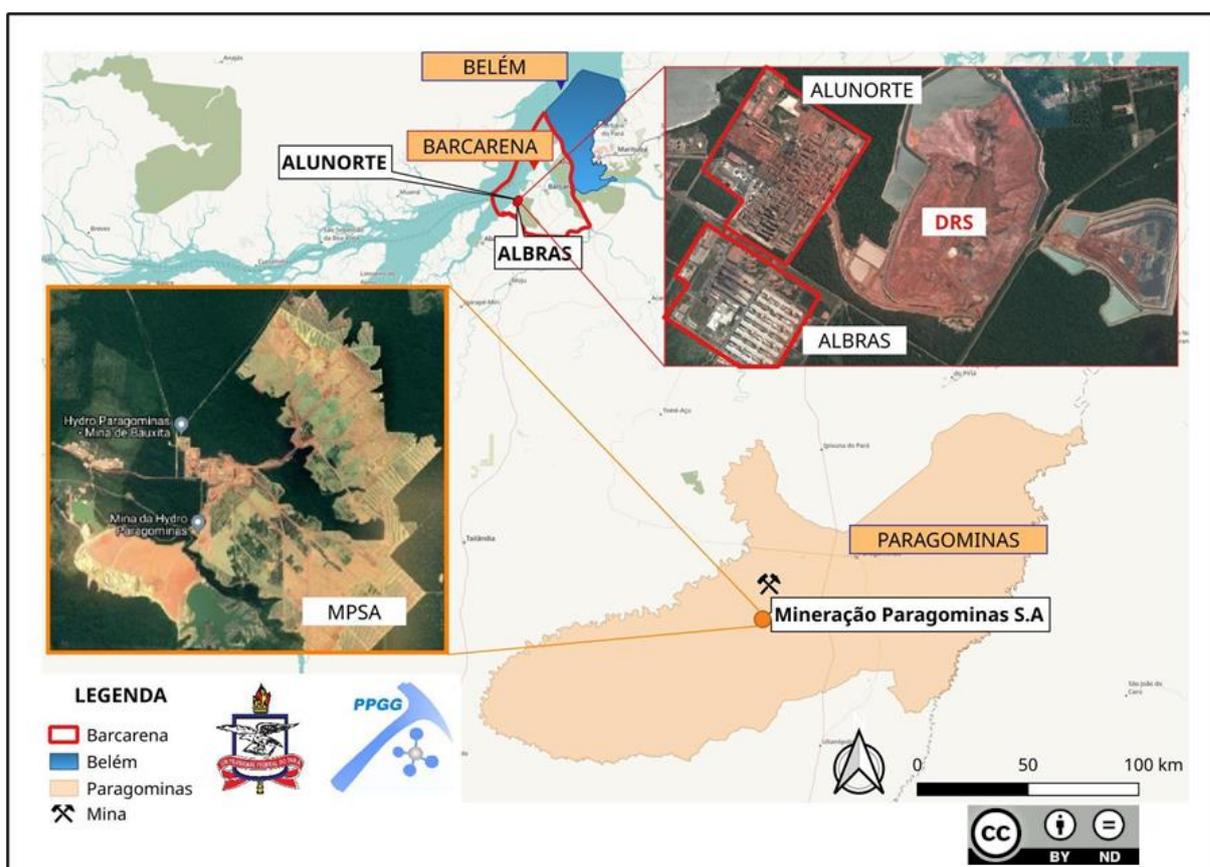


Figura 1 – Localização da Área de Estudo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor | Utilizando software QGIS.

Segundo Kotschoubey (2005), a Província Bauxitífera de Paragominas ocupa área da ordem de 50.000 km<sup>2</sup>, localizada nas porções leste do estado do Pará e oeste do estado do Maranhão, na Amazônia Oriental. Trata-se do mais extenso e denso agrupamento de depósitos de bauxita da Amazônia e do Brasil e possui cerca de 300 km de extensão norte-sul por até 200 km na direção Leste-Oeste. Comporta, a sul de Paragominas, os distritos de Miltônia, Gurupi, Tiracambu, Camoai, e a norte da citada localidade, os distritos de Futuro e Jabuti. As reservas de minério metalúrgico aproveitável estão avaliadas em cerca de 2000 Mt, o que constitui aproximadamente 60% das reservas brasileiras de bauxita. O potencial individual dos maiores

depósitos pode alcançar 150-170 Mt, caso do platô Miltônia, situado a cerca de 50 km a sudoeste de Paragominas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

O platô onde está localizada a mina Miltônia 3, pertence à Província Bauxitífera de Paragominas (figura 2), e, segundo Calado (2017 *apud* Góes 1981) ele é formado a partir de sedimentos siliciclásticos das formações Itapecuru e Ipixuna, tidas como do Cretáceo Superior, Kotschoubey & Truckenbrodt (1981), reportam estas formações como pertencentes à Bacia de São Luís – Grajaú.

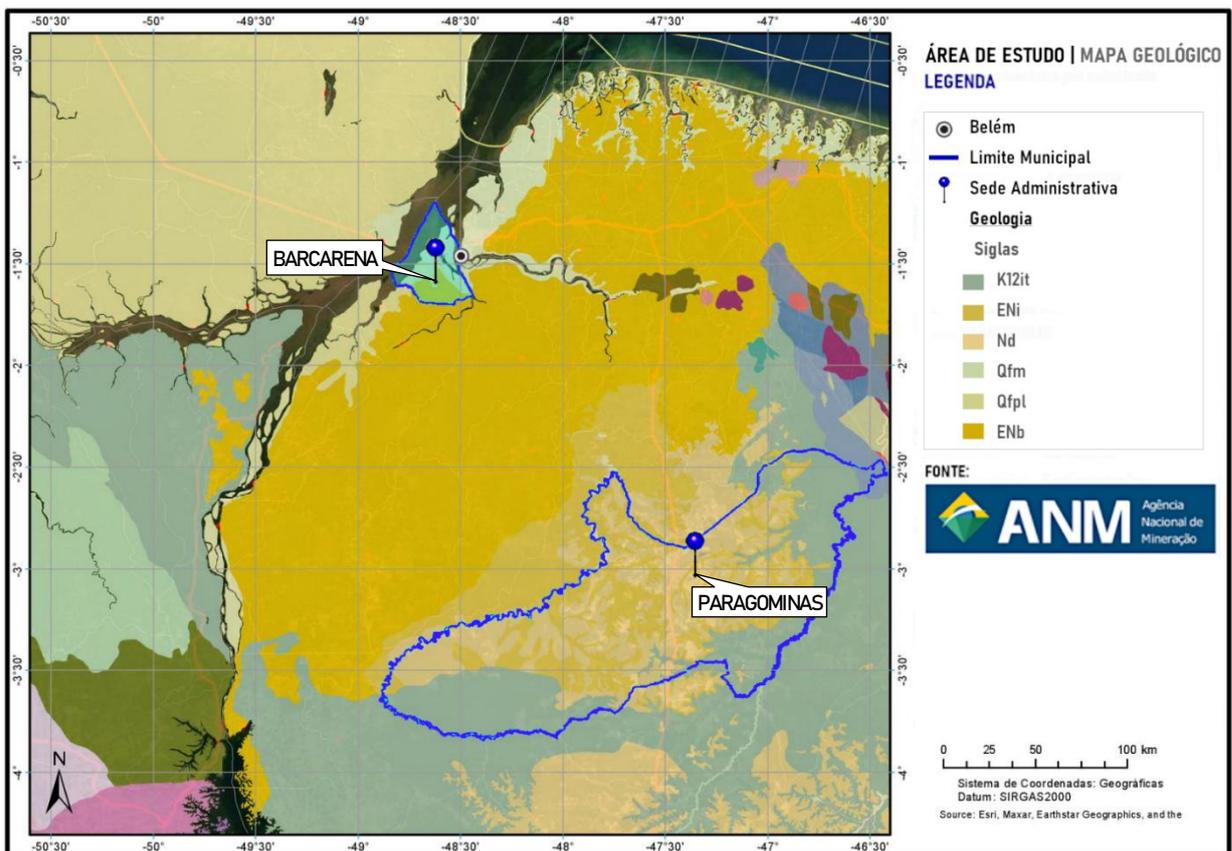


Figura 2 – Mapa de localização e geologia da região de Paragominas.

Fonte: Modificado de SIGMINE (2021).

### 2.1.1 Bacia de São Luís - Grajaú

Segundo Pereira (2015 *apud* Góes & Coimbra 1996, Góes & Rossetti 2001), a Bacia São Luís-Grajaú (Figura 3) estende-se pela porção leste do Pará, oeste do Maranhão e região leste do estado do Piauí ocupando uma área de aproximadamente 50.000 km<sup>2</sup>. Separa-se da bacia paleozoica do Parnaíba a sul, pelo Lineamento Estrutural Xambioá, a leste pelo Lineamento do Rio Parnaíba e a noroeste pelo Arco do Capim.

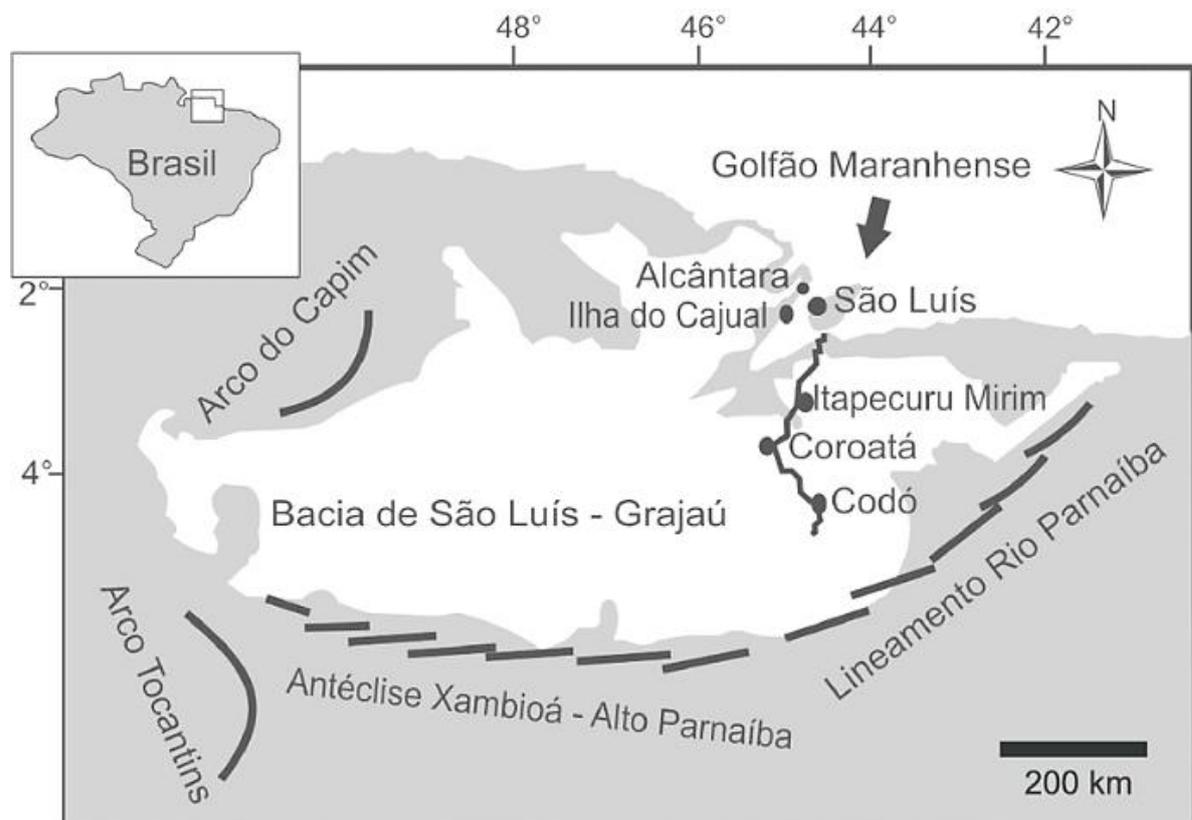


Figura 3 - Localização da bacia de São Luís-Grajaú na região meio-norte do Brasil.

Fonte: Araújo *et al.*, modificado de Rossetti (2001)

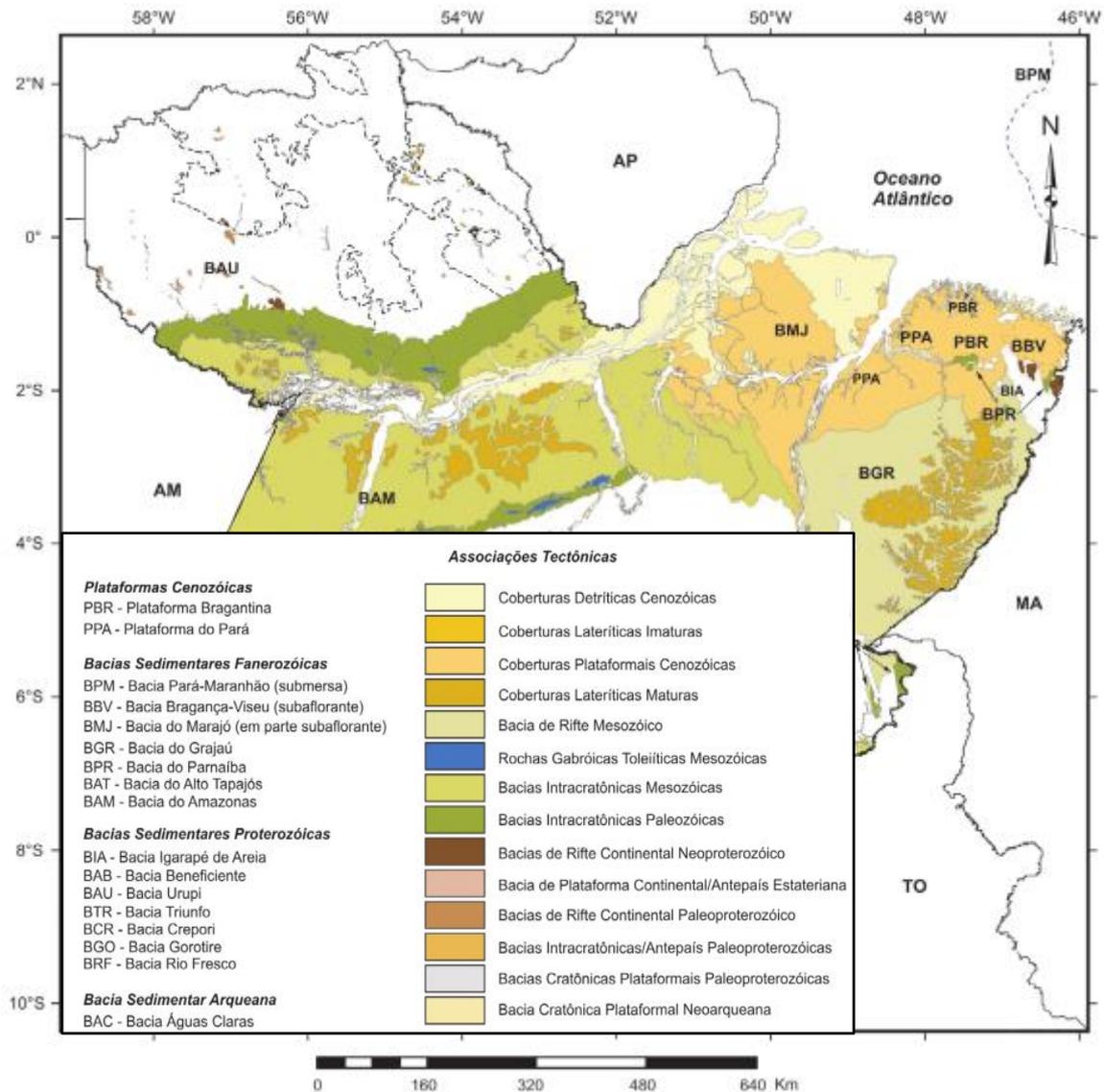


Figura 4 - Bacias Fanerozóicas do Estado do Pará.  
Fonte: Geologia do Pará, modificado de CPRM (2008).

Na figura 4, observa-se a região de Paragominas contextualizada como Cobertura Laterítica Matura localizada sobre a Bacia do Grajaú (BGR). Segundo Pereira (2015 *apud* Aranha *et al.* 1990, Chang *et al.* 1990, Dias *et al.* 1990, in Miranda 2005), a gênese da Bacia de São Luís-Grajaú está relacionada ao rompimento dos continentes sul americano e africano e sua evolução é caracterizada em três fases: Pré-rift, que ocasionou uma ampla depressão com baixa subsidência e com predomínio de deposição de sedimentos terrígenos; Rift, que ocorreu forte tectonismo extensional acompanhado de rebaixamento da Bacia e a deposição de espessos pacotes de sedimentos com predomínio de ambientes transicionais-marinhos; e, por fim, a fase

de drift ocorrendo ampliação e aprofundamento oceânico com predomínio de sedimentação marinha.

Conforme Calado (2017), a Bacia de São Luís-Grajaú de idade Cretácea, compõem uma das quatro bacias menores distintas em suas gêneses juntamente com Bacia do Parnaíba do Siluriano-Triássico, Bacia de Alpercatas do Jurássico-Eocretáceo e a Bacia do Espigão Mestre do Cretáceo, e compreende um semi-graben intracontinental originado durante o processo de separação dos continentes sul-americano e africano, iniciado no Eocretáceo (Góes e Coimbra 1996). O preenchimento sedimentar deu-se no Aptiano-Cenomaniano, com a formação de arenitos, argilitos, evaporitos e calcários correspondentes à sucessão Grajaú-Codó-Itapecuru, cuja sedimentação ocorreu em ambientes eólico, flúvio-lacustre e estuarino.

### Grupo Itapecuru

A Formação Itapecuru passou a ser denominada de Grupo Itapecuru (figura 5) para os arenitos cinza esbranquiçados, esverdeados ou vermelhos-castanhos, podendo haver intercalações destes (Rossetti & Truckenbrodt 1997).

Estratigrafia				
Idade		Bacia de São Luís		Bacia de Grajaú
QUATERNÁRIO		<b>N</b>		<b>S</b>
TERCIÁRIO		Fms. Pirabas/Barreiras		
CRETÁCEO	Cenoman./ Maastrich.	GRUPO ITAPECURU	Fm. Cujupe	
			Fm. Alcântara	Depósitos Itapecuru
	Unidade		Indiferenciada	
	Fms. Codó/Grajaú		Codó/ Grajaú	
	Aptiano		S1	
Albiano	Neo	S3		
	Meso	S2		
	Eo			

Figura 5 – Quadro estratigráfico da Bacia do Grajaú (em destaque o Grupo Itapecuru).  
Fonte: Calado, 2017 (adaptado de Góes e Coimbra 1996).

As litologias predominantes são arenitos em camadas métricas ou em corpos lenticulares e camadas de pelitos (folhelhos). Seu ambiente deposicional está relacionado a deltas de marés e tempestades. São encontradas nestas rochas deformações sinsedimentares relacionadas a sismos (Rossetti 2001).

### Formação Ipixuna

Conforme Calado (2017), essa formação ocorre predominantemente a leste do estado do Pará e é considerada como uma fácies da Formação Itapecuru (Petri & Fúlfaro 1983). Datada no Cenozoico é associada à sucessão de argilas brancas, caulínicas e arenitos finos a grossos, com espessura média de 50 metros.

Os depósitos caulínicos da Formação Ipixuna na região do Rio Capim, possuem grande importância econômica devido a sua excepcional qualidade, sendo composto por argilitos, arenitos finos a médio, moderadamente selecionados e essencialmente caulínicos (caulim soft), provindos de ambiente deposicional típico de complexo fluvial na base e gradando verticalmente para complexo estuarino no topo de acordo com Kotschoubey, *et al.* (1996), Santos Jr. & Rossetti (2003) e Rossetti (2004).

Segundo Nascimento & Góes (2005), as paleocorrentes do complexo fluvial da Formação Ipixuna formaram os depósitos de caulim soft, os arenitos arcoseanos que deram origem ao caulim são oriundos da porção oeste/sudoeste da Faixa Araguaia e parte de seu embasamento cristalino, formado principalmente por rochas metamórficas além de contribuições graníticas. A presença de estauroлита, cianita, micas (biotita e muscovita) e fragmentos líticos neste depósito caulínico são associados a rochas metamórficas pertencentes ao Supergrupo Baixo Araguaia.

Segundo Kotschoubey, *et al.* (2005), estes depósitos caulínicos da Formação Ipixuna, sustentam o espesso manto laterítico/ferruginoso, predominantemente aluminoso da Província Bauxitífera de Paragominas.

### **2.1.2 Plataforma Bragantina**

Segundo Pereira (2015), o embasamento na porção norte da Plataforma Bragantina (Figura 2.2) é constituída por unidades pré-cambrianas do domínio Cráton São Luís/Faixa Gurupi e na porção meridional por sedimentos Ipixuna da Bacia do Grajaú.

Sedimentos químicos da Formação Pirabas do final do Oligoceno-Mioceno Inferior constituem a base da Plataforma, e na porção superior, os sedimentos litorâneos e continentais da Formação Barreiras do Mioceno Médio (Goés 1981, Ferreira *et al.* 1984, Costa & Hasui 1997, Rosseti 2001). Esses sedimentos fazem contato com a cobertura laterítica do Mioceno Superior (Rosseti 2001, Kotschoubey *et al.* 2005). A unidade mais recente registrada na região é denominada de Sedimentos Pós-Barreiras, formada por sedimento areno-argilosa a argilo-arenoso, de idade quaternária (Sá 1969, Rosseti *et al.* 1989), entretanto Rosseti (2007) a posiciona na idade pliocênica a pleistocênica.

A plataforma Bragantina é cortada na direção Leste-Oeste por um alto-estrutural, o Arco do Guamá, em sua porção norte, na região em que o Arenito do Guamá do Eon paleozoico está exposto (Truckenbrodt & Alves, 1982; Truckenbrodt *et al.* 2005).

A Província Bauxitífera de Paragominas apresenta sequências geológicas citadas acima na direção Sul. Essa constatação foi feita em base de trabalhos desenvolvidos na região por Calaf (2000) e Kotschoubey *et al.* (2005).

#### Formação Pirabas

De acordo com Pereira (2015), a Formação Pirabas ocorre nos estados do Pará, Maranhão e Piauí, tendo sido registrado primeiramente por Ferreira Pena (1876), no qual observou calcários intensamente fossilíferos na ilha de Fortaleza. Seus melhores afloramentos estão expostos nas regiões litorâneas do nordeste do Pará. Composicionalmente é formada por rochas carbonáticas e margas intensamente fossilíferas com intercalação de folhelhos e arenitos calcíferos, depositada durante o Mioceno Inferior em plataforma carbonática marinha rasa, em lagunas e mangues, em clima quente.

#### Formação Barreiras

Conforme Pereira (2015), a Formação Barreiras corresponde a uma intensa faixa litorânea que se estende desde a foz do Amazonas até o Rio de Janeiro, formada na parte inferior por alternância de níveis argilosos e arenosos, contendo pequenos fragmentos de argila semi-flint, a sequência superior é composta por argila-arenosa maciça e seixos de quartzos dispersos no pacote.

## Sedimentos Pós-Barreiras

Os Sedimentos Pós-barreiras são considerados como resultantes de espesso manto de alteração intempérica da Formação Barreiras (Mabesoone *et al.* 1972, Mabesoone, 1984).

As exposições mais expressivas de Sedimentos Pós-Barreiras (tabela 1) do Norte e Nordeste do Brasil estão localizadas no litoral maranhense, principalmente entre as cidades de Alcântara e Guimarães (Rosseti *et al.* 2013).

Este pacote sedimentar foi dividido em duas unidades estratigráficas: a unidade superior é constituída predominantemente por areias de coloração creme avermelhado a alaranjada, maciças, localmente bioturbadas de forma intensa, de seleção moderada a boa, granulometria fina a média, podendo ser localmente grossas a conglomeráticas. Pelitos e argilitos bioturbados estão presentes nessa sequência sedimentar. A unidade superior é composta por areias de granulometria fina a muito fina e bem selecionadas, não apresenta estrutura sedimentar. A coloração deste pacote varia em diversos tons de amarelo (Pereira 2015).

Tabela 1 - Coluna litoestratigráfica integrada da Bacia do Grajaú e da Plataforma Bragantina. Fonte: Pereira, 2015 (adaptado de Kotschoubey *et al.* 2005).

Unidade estratigráfica	Idade	Referências
Sedimentos Pós-Barreiras	Quaternário/ Plio-Pleistoceno/Plioceno	Rosseti <i>et al.</i> (1989) Rosseti (2001) Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)
Coureaça ferruginosa/ <i>Stone-layers</i>	Final do terciário/início do quaternário Mioceno superior/ Plioceno inferior Mioceno superior	Kotschoubey <i>et al.</i> (1996) Rosseti (2001) Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)
Formação Barreiras	Mioceno a Plio-Pleistoceno Mioceno Médio	Rosseti <i>et al.</i> (1989) Rosseti (2001)
Formação Pirabas	Oligoceno final-Mioceno Inf. Mioceno Inferior	Ferreira <i>et al.</i> (1984) Goês <i>et al.</i> (1990) Rosseti (2001)
Argila de Belterra (protólito)	Anterior à Formação Pirabas	Kotschoubey <i>et al.</i> (1996)
Coureaça laterítica- bauxítica	Eoceno-Oligoceno	Truckenbrodt <i>et al.</i> (1982)
Formação Ipixuna	Cretáceo Superior- Terciário inferior ?	Francisco <i>et al.</i> (1971) Rosseti & Truckenbrodt (1999) Santos Jr. & Rosseti (2003)
Depósito Itapecurú	Cretáceo Superior	Rosseti & Truckenbrodt (1997) Rosseti & Truckenbrodt (1999) Anaisse Jr. (1999)
Formação Codó	Cretáceo (Aptiano)	Petri & Fúlfaró (1983)
Formação Grajaú	Cretáceo (Aptiano)	Petri & Fúlfaró (1983)

## 2.2 DESCRIÇÃO DO PERFIL BAUXÍTICO NO PLATÔ DA MINA MILTÔNIA 3

Conforme Oliveira (2017), O perfil bauxítico presente na mina Miltônia 3 em Paragominas é constituído de seis horizontes litológicos, os horizontes litológicos de Miltônia 3 diferem, entre si, por variações na estrutura e na quantidade de óxidos-hidróxidos de alumínio, ferro e sílica e muitas vezes ocorrem ausência de um ou mais horizontes no perfil (Picanço *et al.* 2013).

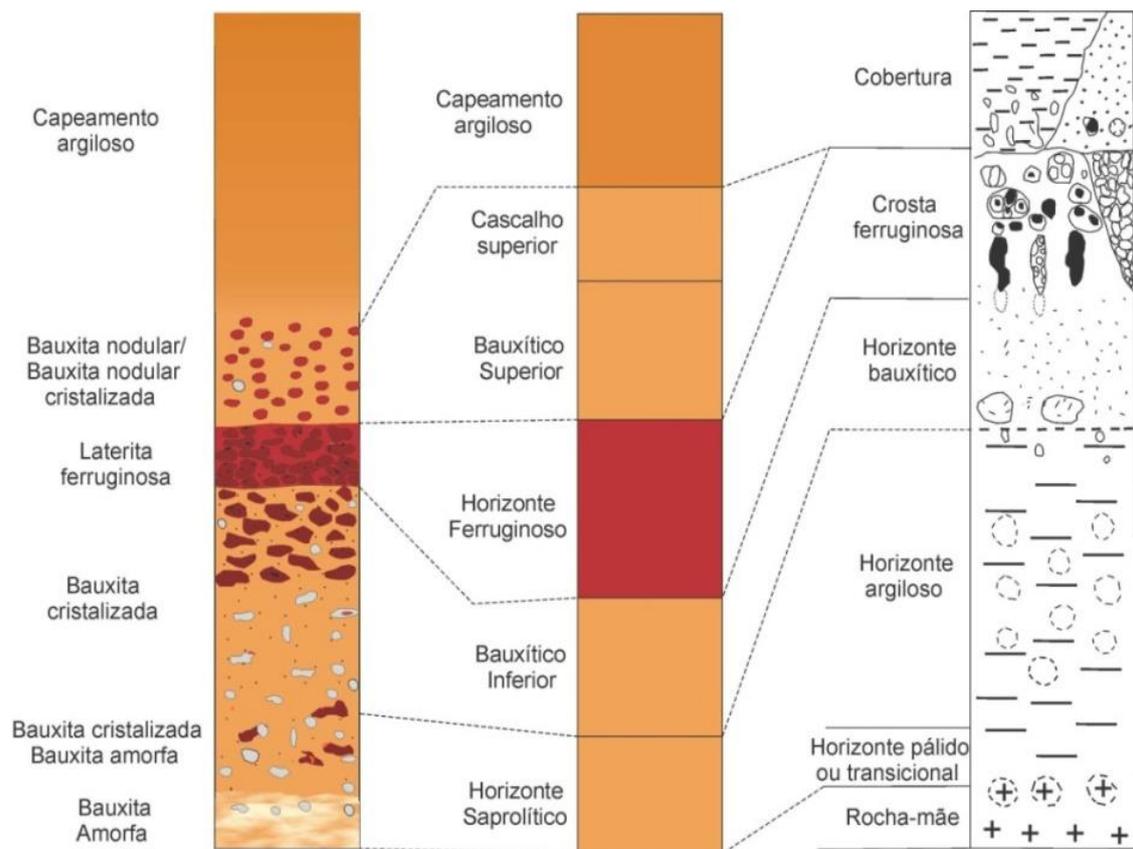
Para a descrição dos horizontes presentes no perfil adotado neste trabalho, utilizou-se a seguinte nomenclatura (da base para o topo): BA: Bauxita Amorfa; BCBA: Bauxita Cristalizada-Bauxita Argilosa; BC: Bauxita Cristalizada; LF: Laterita Ferruginosa; BNC: Bauxita Cristalizada Nodular; BN: Bauxita Nodular; e CAP: Capeamento Argiloso. A estruturação do perfil se apresenta conforme o esquema na figura 6 e a correlações entre perfis e nomenclaturas definidas para cada horizonte estão representadas nas figuras 7 e 8, respectivamente.



Figura 6 - Desenho esquemático do perfil bauxítico. Adaptado de Kotschoubey (2005).

Segundo Pereira (2015), o Capeamento Argiloso (CAP) é constituído de material inconsolidado areno-argiloso de coloração vermelho laranja, e, em horizonte ligeiramente

inferior na Bauxita Nodular (BN), encontram-se nódulos ferruginosos de até 1,5 cm, envoltos, esporadicamente, por goethita, apresentando formas sub-angulosas a sub-arredondadas. No horizonte BNC, constata-se composição semelhante à do horizonte BN, sendo sua constituição nódulos ferruginosos de até 1,5 cm, envoltos por córtex goethítico, apresentando formas sub-angulosas a sub-arredondadas. A Laterita Ferruginosa (horizonte LF), é composta essencialmente por concreções ferruginosas, geralmente de formato irregular, imersos em cimento caulínítico. Em relação ao horizonte BC, este é caracterizado pela presença abundante de gibbsita microcristalina, nódulos gibbsíticos na base e concreções ferruginosas no topo, ambos imersos em matriz caulínítica. O horizonte argiloso de coloração vermelho alaranjado, composto por nódulos gibbsíticos, raras concreções ferruginosas e gibbsita microcristalina, é característico da faixa BCBA e na base do perfil está localizada a Bauxita Amorfa (BA), um material argiloso, com presença de nódulos gibbsíticos no topo, porções mosqueadas, textura porosa, estrutura colunar e incoeso.



Fonte: Modificado de Kotschoubey *et al.* (2005) Fonte: Modificado de Costa (1991)

Figura 7 - Correlação entre os perfis definido pela empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA).  
Fonte: Pereira (2015), adaptado de Kotschoubey *et al.* (2005) e Costa (1991)

	<b>Costa (1991)</b>	<b>Kotschoubey et al. (2005)</b>	<b>Mineração Paragominas S.A (MPSA)</b>
<b>Horizonte</b>	Cobertura	Cobertura	Cobertura
	_____	Cascalho superior	Bauxita nodular
	_____	Bauxita superior	Bauxita nodular cristalizada
	Crosta ferruginosa	Horizonte Ferruginoso	Laterita ferruginosa
	Bauxítico	Bauxítico inferior	Bauxita cristalizada
	Argiloso	Saprolítico	Bauxita argilosa bauxita cristalizada
	Pálido ou transicional		Bauxita argilosa
	Rocha-mãe	_____	_____

Figura 8 - Correlação entre as nomenclaturas definidas para cada horizonte segundo os referidos autores. Fonte: Costa (1991), Kotschoubey *et al.* (2005) e Mineração Paragominas S.A (MPSA).

### 2.3 MINERALOGIA DA BAUXITA

Conforme Kotschoubey (2005), a cobertura laterítica/bauxítica, produto do intemperismo extremo de rochas sedimentares siliciclásticas, compõe-se de minerais resultantes do mais alto grau de alteração ou seja, de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), goethita ( $\text{FeOOH}$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), aos quais devem ser acrescentados traços de quartzo reliquiar, vestígios de mica fortemente degradada e minerais pesados de maior resistência nas condições tropicais úmidas tais como rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), turmalina e zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

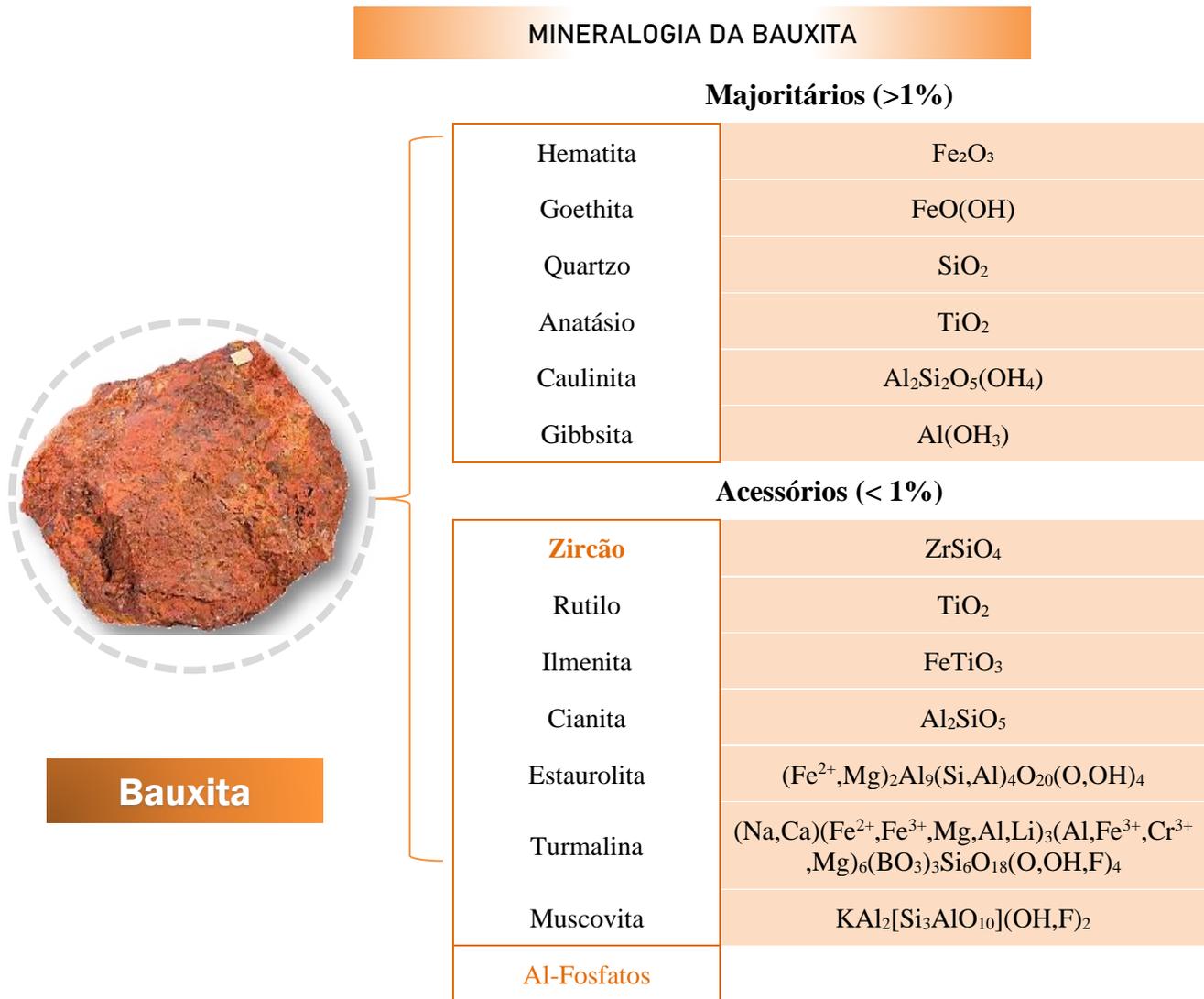


Figura 9 – Mineralogia da Bauxita

Fonte: Adaptado de Angélica (2019) *apud* Kotschoubey (2005)

### 2.3.1 Elementos-Traço

Ainda de acordo com o estudo de Kotschoubey (2005), os teores de elementos-traço encontrados são muito mais baixos que as médias crustais para os elementos Ba, Sr, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr [sic], e, por vezes até muito mais elevados, como no caso dos elementos Zr, Hf, Ga, Nb, Th [sic], porém o autor afirma que isto por si tem pouco significado, pois a evolução do manto residual consistiu em múltiplas etapas de mobilização e transferência de elementos maiores e traço, além de ocasional retrabalhamento físico dos produtos de alteração.

Via de regra, os elementos-traço apresentam enriquecimento bastante variável no manto residual em relação a seus teores nos sedimentos parentais alterados. Para melhor compreensão da distribuição dos elementos-traço neste manto, devem ser considerados fatores como composição mineralógica e química dos diversos horizontes, a natureza e abundância dos minerais resistentes contidos na cobertura residual e natureza dos processos envolvidos em sua formação (Kotschoubey 2005).

Kotschoubey (2005) afirma que a excelente correlação, em todos os horizontes, de Zr com Hf (até 1,00), Y e ETR<sub>P</sub> (Yb e Lu), sugere que, o zircão é o único mineral portador de Zr. Na figura 10 estão listados os teores médios dos elementos-traço constituintes dos horizontes do manto laterítico bauxítico (no domínio meridional).

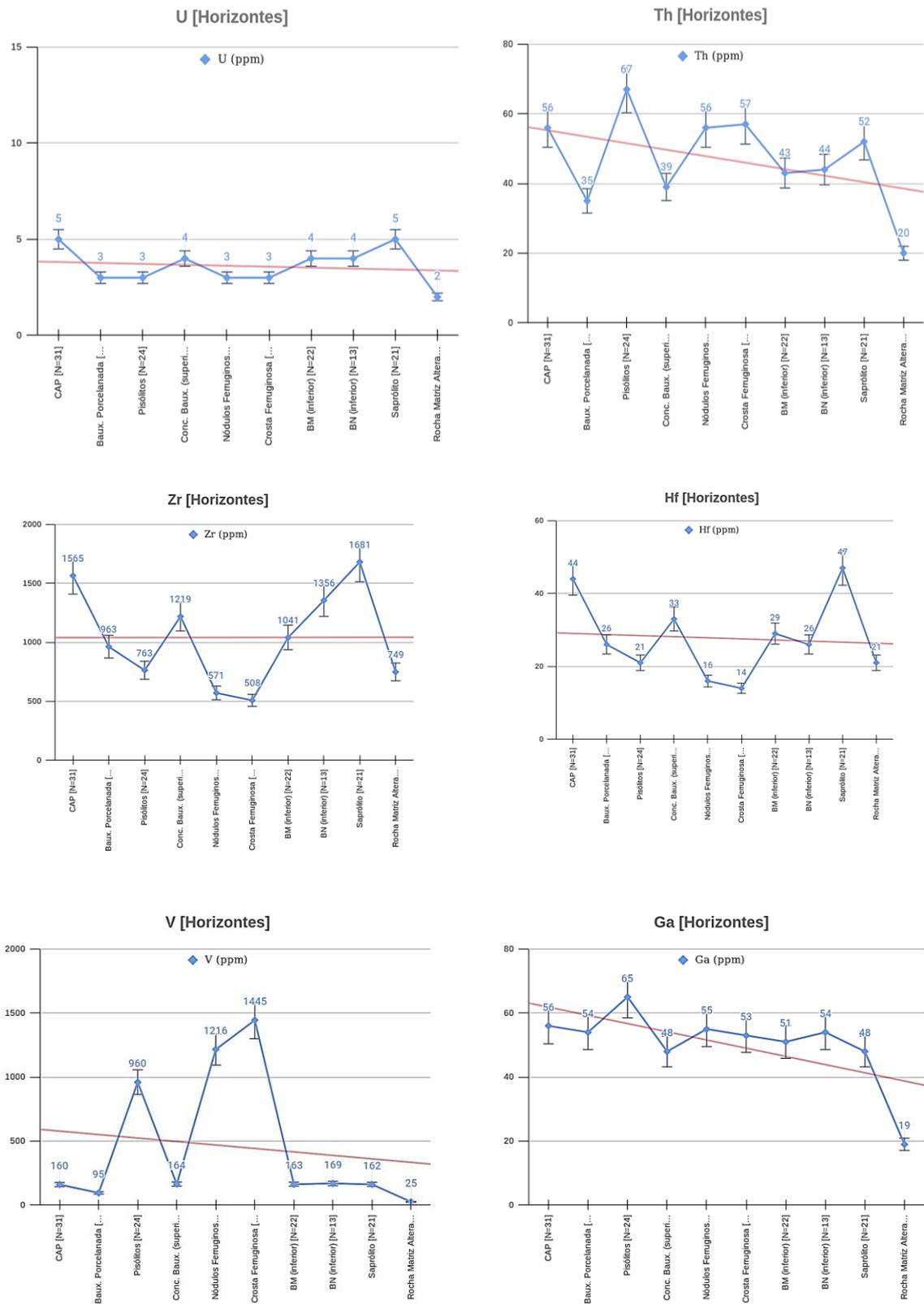


Figura 10 – Análise gráfica dos Teores médios de Elementos-Traço nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey (2005).

### 2.3.2 Elementos Terras-Raras (ETR)

Os padrões de distribuição de ETR nos diferentes horizontes são muito parecidos. O padrão comum, com normalização a NASC (Gromet *et al.* 1984), se caracteriza por forma em U aberto e assimétrico, devido a marcante enriquecimento relativo tanto em ETR mais leves (La e Ce), como em ETR pesados (Yb e Lu), e depressão acentuada no intervalo Nd, Sm e Eu (Kotschoubey 2005).

Segundo Kotschoubey (2005), parte importante de ETR encontra-se provavelmente em minerais resistentes, basicamente zircão e fosfatos de Al, o que faz com que os teores obtidos reflitam mais a composição dos diversos horizontes que a própria distribuição destes elementos.

O único mineral portador de ETR pesados reconhecido no manto residual em estudo é o zircão; por outro lado, ETR leves (La e Ce, sobretudo) [figura 11] de origem desconhecida, se encontrariam, pelo menos em parte, fixados em fosfatos de Al. Sendo o zircão e os fosfatos de Al minerais estáveis, é provável que outros minerais fonte de ETR, mais vulneráveis e, portanto, mais rapidamente decompostos, tenham existido originalmente nos sedimentos. Talvez certa quantidade de ETR tenha sido liberada pela dissolução do zircão (Nahon & Merino 1996, 1997), mas, neste caso, tratar-se-ia preferencialmente de ETR pesados (Kotschoubey 2005).

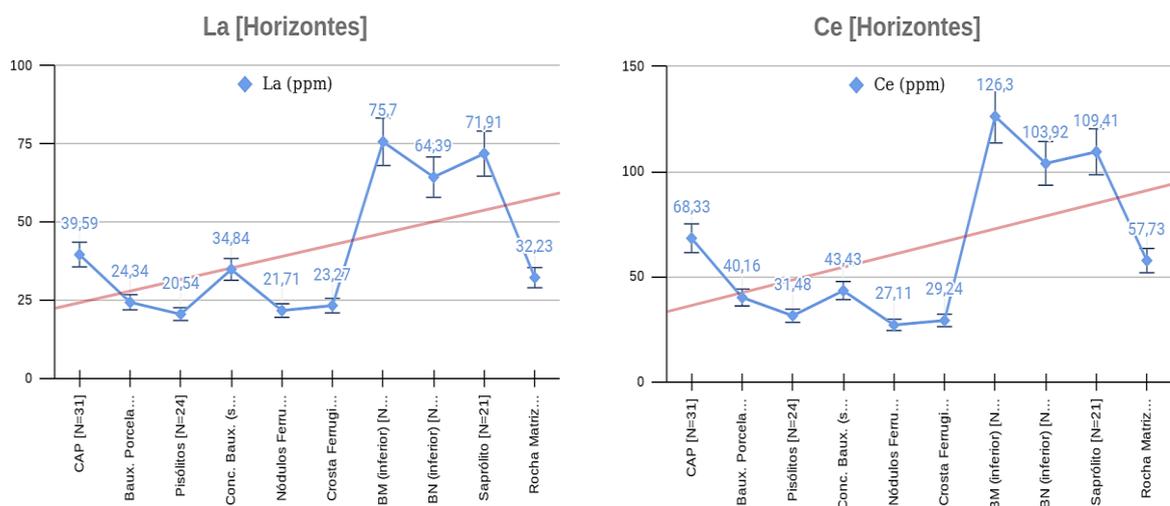


Figura 11 – Análise gráfica dos Teores médios de ETR nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.

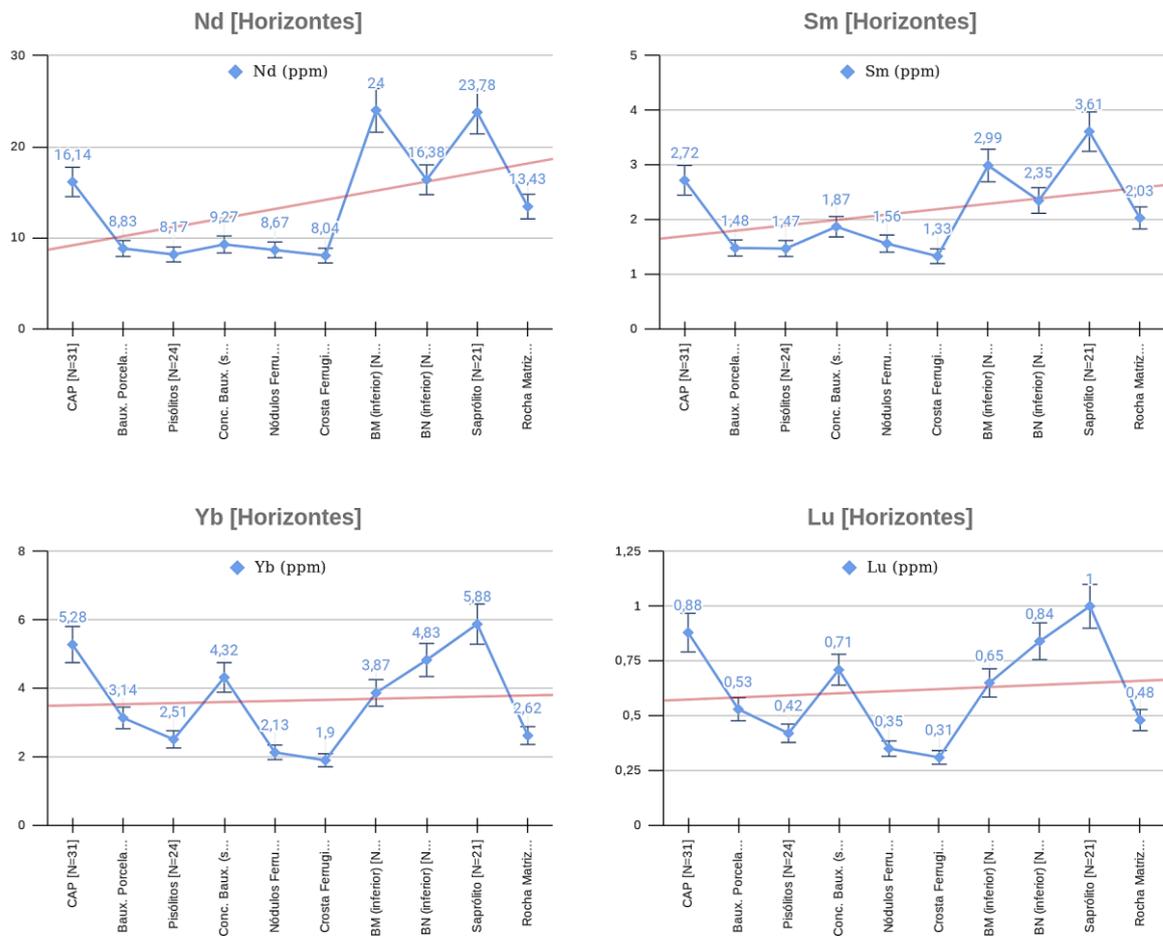


Figura 11 – Análise gráfica dos Teores médios de ETR nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto de pesquisa recebeu apoio da empresa Hydro e está inserido em um convênio guarda-chuva de cooperação técnico-científica UFPA-Hydro, assinado pela UFPA. A maioria das análises químicas e mineralógicas foram realizadas nos laboratórios do nosso grupo de pesquisa, Grupo de Pesquisa em Ciência e Engenharia Mineral – GCEM.

Despesas adicionais foram custeadas através da taxa de bancada da Bolsa de Produtividade em Pesquisa-CNPq do orientador deste trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS

As amostras de bauxitas com os seus respectivos resultados analíticos, utilizados no presente trabalho, são provenientes de dois estudos orientativos distintos realizados pela empresa Hydro, ambos acompanhados pelo orientador da presente dissertação de mestrado:

- 1) Estudo orientativo em malha de amostragem no Platô Miltônia 3 – São amostras provenientes de uma malha de sondagem 25m x 25m, com 174 furos, realizadas no platô Miltônia 3, em 2012, antes do avanço da frente de lavra para esta porção do platô. Desta malha, foi selecionada para o presente trabalho, a seção HIJ-231, com 23 furos de sondagem (Furos FM0047 a FM0049), totalizando 187 amostras. Nestas, além das análises geoquímicas multielementares, foram realizados estudos estatísticos (Cluster Analysis) em resultados de difração de raios-x, no conjunto das amostras de toda a malha de amostragem.
- 2) Estudo orientativo em frações granulométricas de amostras de processo – Foram analisadas diferentes frações granulométricas (<5" >1/2"; <1/2" >20#; <20# >150#; <150# >400#; <400# (37µm); <37µm >20µm; <20µm >10µm; <10µm >5µm e <5µm), de amostras de bauxita da alimentação do moinho SAG (AL SAG); da alimentação do espessador de concentrados (AL ESP CON) e da alimentação do espessador de rejeitos (AL ESP REJ). O objetivo principal do referido estudo orientativo, além de verificar as melhores frações de recuperação de minério (gibbsita), com menor proporção de argila (caulinita), era verificar o porquê de algumas faixas granulométricas (por ex., <150# - >400#) não apresentarem fechamento químico na análise de FRX, o que tem a ver com o objetivo principal da presente dissertação.

Este trabalho foi realizado com amostras provenientes de 1 perfil bauxítico (seção HIJ-231), situados na mina Miltônia 3, coletadas por meio de furos de sondagem e/ou de frente de lavra. Também foram analisadas amostras de processo unitário (alimentação do moinho SAG da Usina I) separadas em diferentes frações granulométricas, fornecidas pela empresa Hydro, segundo o esquema da Figura 12.

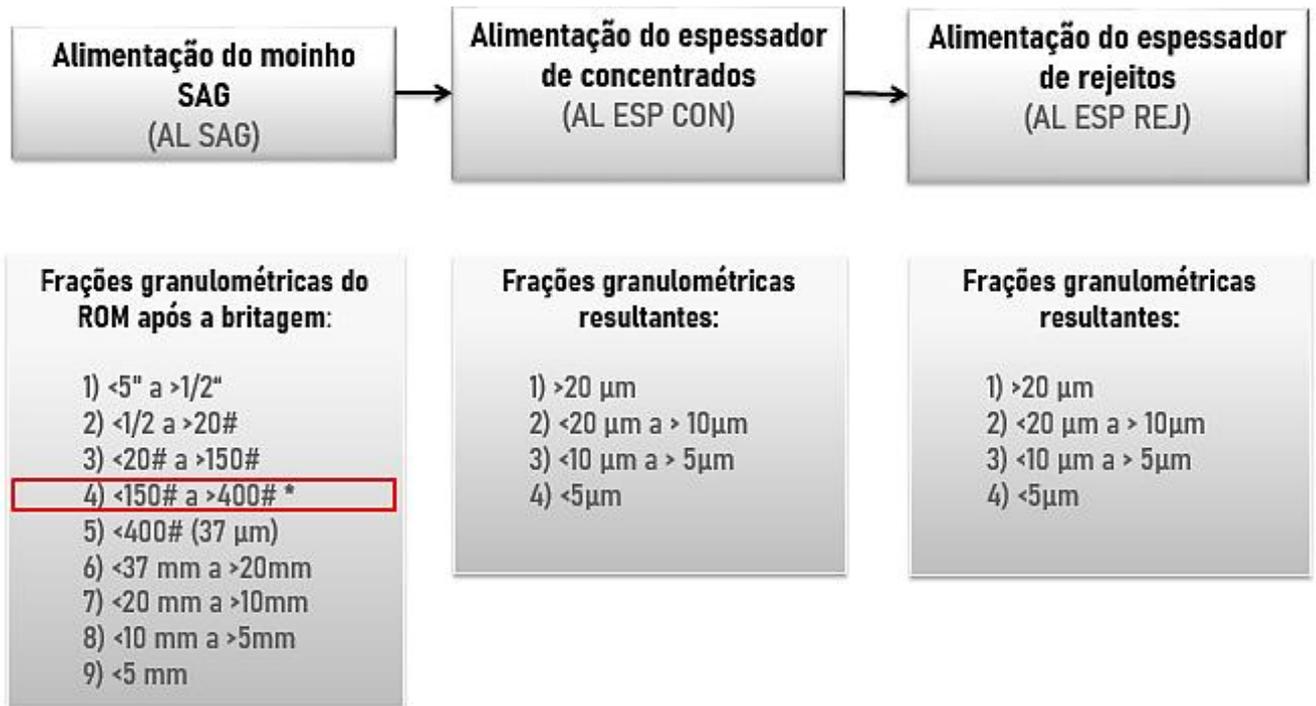


Figura 12 – Fluxograma das amostras de processo e frações granulométricas analisadas neste trabalho, e que foram fornecidas pela empresa Hydro.

As amostras de bauxita utilizadas neste trabalho foram fornecidas pela empresa Norsk Hydro; o material é proveniente de uma malha de amostragem de 174 furos de sondagem, localizada na Mina Miltônia, cada seção tem 23 furos em linha, como apresentado esquematicamente, na figura 13, os testemunhos coletados e analisados fazem parte da seção HIJ-231, furos 47—69.

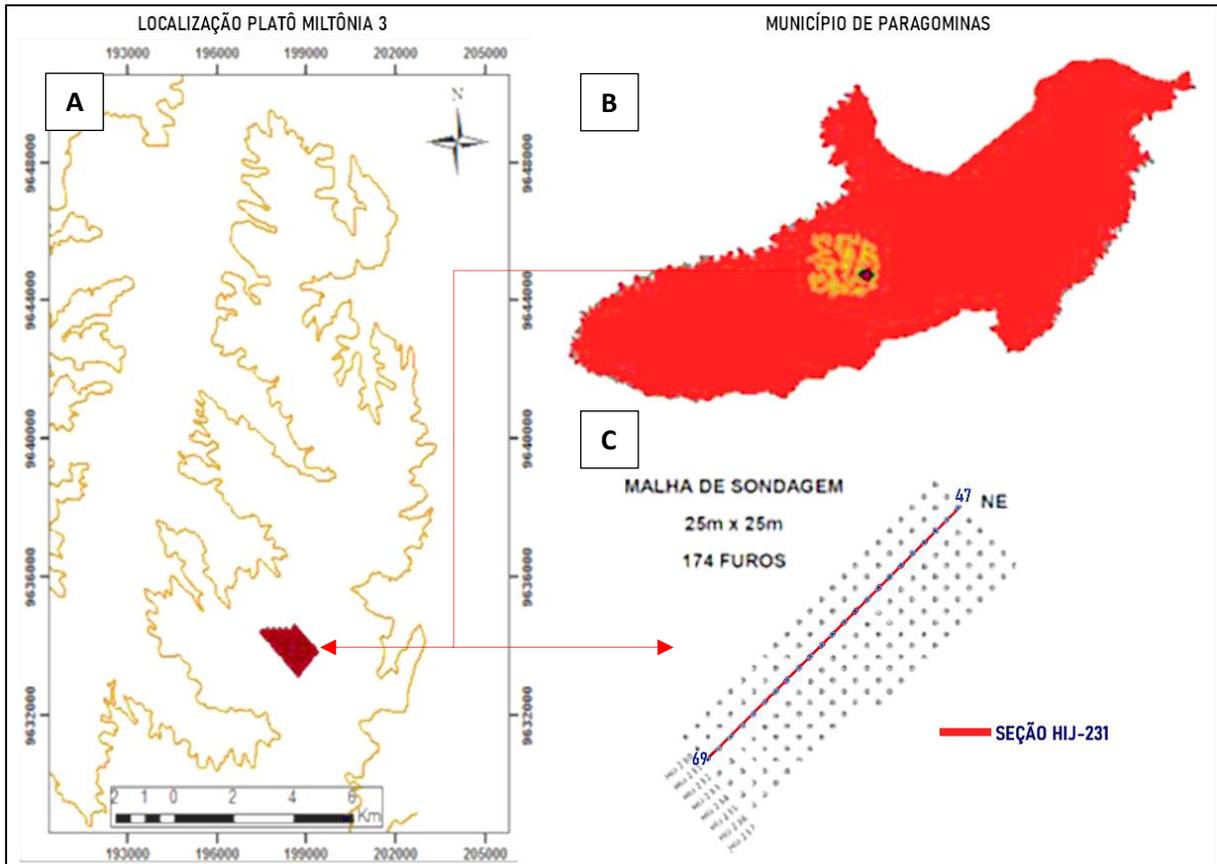


Figura 13 – Mapa de localização dos furos de sondagem e Perfil com a malha de sondagem 25m x 25m na Mina Miltônia 3. Fonte: Adaptado de Picanço *et al.* (2013), Norsk Hydro (2013).

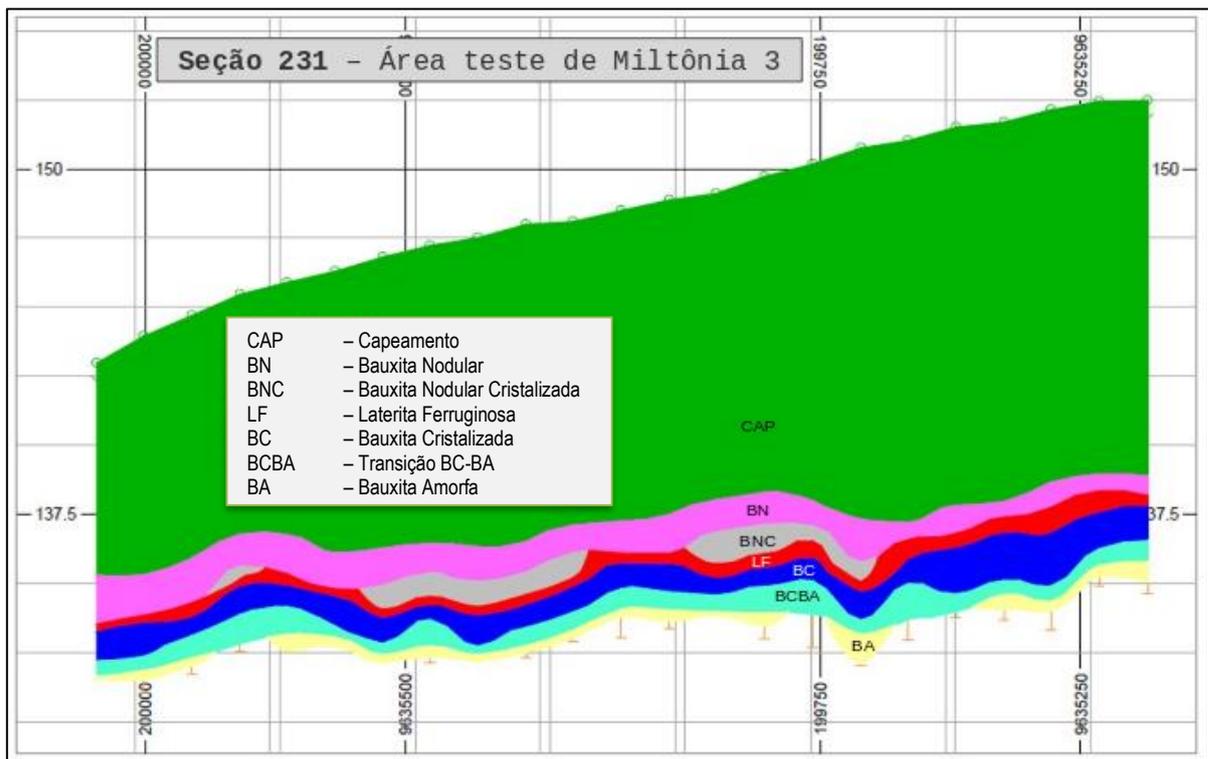


Figura 14 – Litografia da seção HIJ-231, malha de sondagem 25x25m. Fonte: Norsk Hydro

Dessa malha, selecionamos uma seção (HIJ-231), dos furos 47 a 60 [figura 13-C], para análise multielementar (conforme tabela 2), e, para demais amostras, a empresa analisou apenas os elementos padrão do controle de processo, que são:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , PF (por FRX), alumina aproveitável e sílica disponível, por digestão alcalina (semelhante ao processo Bayer) um tipo de análise específica da indústria do Al. O resumo esquemático pode ser verificado na figura 15 a seguir.

<b>Malha de Sondagem:</b> 174 furos (TOTAL)	
<b>Seção:</b> 23 furos/linha   8 linhas (TOTAL)	
Seção utilizada: HIJ-231	} 187 Amostras
Furos selecionados: 47—69	

Figura 15 – Resumo da proveniência/disponibilidade dos materiais e planejamento de análises. Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Comparativo de análises multielementares segmentado por conjunto de furos da Seção HIJ-231.

	<b>Furos 47—60</b>	<b>Furos 61—69</b>
ALA(%)	✓	✓
SIRE(%)	✓	✓
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	✓
SiO <sub>2</sub> (%)	✓	✓
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
CaO(%)	✓	
MgO(%)	✓	
TiO <sub>2</sub> (%)	✓	✓
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	✓	
Na <sub>2</sub> O(%)	✓	
K <sub>2</sub> O(%)	✓	
MnO(%)	✓	
Co(%)	✓	
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
ThO <sub>2</sub> (%)	✓	
WO <sub>3</sub> (%)	✓	
BaO(%)	✓	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
PbO(%)	✓	
SnO <sub>2</sub> (%)	✓	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
Cu(%)	✓	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	✓	
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub> (%)	✓	
SrO(%)	✓	
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (%)	✓	
ZnO(%)	✓	
NiO(%)	✓	
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	✓	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	✓	
ZrO <sub>2</sub> (%)	✓	
CeO <sub>2</sub> (%)	✓	
LOI(%)	✓	✓

\*Adaptado de Norsk Hydro.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy – EDS) | MEV–EDS

O principal objetivo das análises micromorfológicas, tanto através da microscopia ótica como da eletrônica, é caracterizar as diferentes possíveis gerações dos minerais descritos, com base nos aspectos micromorfológicos, textural ou mesmo químico, com vistas as fases acessórias portadoras dos elementos de interesse.

Para a obtenção de imagens por MEV e análises químicas por energia dispersiva (EDS), as amostras foram pulverizadas, e, posteriormente, o material foi acondicionado em stubs, metalizados com ouro, o tempo de recobrimento foi de 1,5 minutos, a fim de torná-los eletricamente condutivos, em um sistema automático de metalização, modelo EMITECH – K550XR®. Após a preparação, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico (MEV) modelo LEO-1430.

Para imagens em elétrons retroespalhados, as análises consistiram em corrente do feixe de elétrons = 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 15 mm e tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s.

As condições de análises para imagens de elétrons secundários foram: corrente do feixe de elétrons = 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 10 kV, distância de trabalho = 15 mm.

### 3.2.2 Difractometria de Raio-X (DRX)

Técnica instrumental analítica fundamental para caracterização de fases, análises quantitativas pelo Método de Rietveld (amostra Total) e análises das frações e concentrados, principalmente, por micropreparação.

As análises de DRX foram efetuadas no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) do Instituto de Geociências da UFPA.

A caracterização mineralógica foi realizada a partir do pó das amostras pulverizadas em grau de ágata e para esta etapa foram realizadas as metodologias do pó total e a técnica da micropreparação de amostras, onde se separa manualmente uma parte do material, para obter uma melhor representação mineral da amostra.

Para o método do pó total é utilizada a técnica do back-loading, onde se pulveriza inicialmente uma alíquota de 5 gramas de amostra no gral de ágata, posteriormente são prensadas nos porta amostras de Si sem orientação preferencial e armazenadas em magazine para realização das análises.

Para a técnica da micropreparação é utilizado um mini drill (modelo Dremel 3000 EZ) que consiste no uso de pequenas quantidades de amostras, sem prensagem e configurações da análise convencional ao método do pó total.

O equipamento utilizado foi o difratômetro modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) da PANalytical, goniômetro PW 3050/60 (teta/teta) e tubo de Raios-X de ânodo cerâmico de Cu ( $K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$ ), modelo PW 3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Ceerator RTMS (Real Time Multiple Scanning) no modo scanning e com active length  $2,122^\circ$ , passo angular  $0,033^\circ$ .

Os difratogramas das distintas fases minerais presentes nas amostras, foram interpretados com o auxílio do Software X'Pert HighScore Plus 3.0, comparando os padrões do banco de dados Power Diffraction File (PDF) fornecido pelo International Center for Diffraction Data (ICDD), (2003).

Com base na comparação entre as intensidades das reflexões distintas de cada fase mineral nos difratogramas é possível estimar, relativamente, a abundância dos minerais constituintes maiores, menores e traços, se existentes na amostra.

### **3.2.3 Espectrometria e Fluorescência de Raio-X (FRX)**

Simultaneamente à análise química total das amostras coletadas, alíquotas de algumas amostras foram enviadas para laboratórios comerciais, não só para efeito de comparação dos resultados, como para análise de outros elementos traços de baixo limite de detecção (LD), além dos elementos terras-raras. As análises de sílica reativa (SIRE) e alumina aproveitável (ALA), através de digestão alcalina (via úmida), foram realizadas nos laboratórios da Norsk Hydro, na própria mina.

### **3.2.4 Tratamento dos dados – Índices de Intemperismo Químico**

Os resultados geoquímicos para elementos maiores e traço foram tratados da maneira clássica, em gráficos da distribuição vertical dos elementos, a fim de avaliar o comportamento em função dos diferentes horizontes descritos. Adicionalmente, propôs-se calcular e plotar em

perfis os diferentes Índices de Intemperismo Químico descritos na literatura, como o Chemical Index of Alteration (CIA), Chemical Index of Weathering (CIW), Plagioclase Index of Alteration (PIA) and Vogt's Residual Index (V) (Price & Velber, 2001), para se determinar a alteração química, perda de bases, lixiviação, formação de argilas e oxidação ao longo dos perfis (Retallack, 2001), além dos cálculos iso-elementos tradicionais (iso-titânio, iso-alumínio, etc.).

Os processos analíticos de DRX e FRX foram realizados no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM), situado no Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) enquanto que a etapa de Microscopia Eletrônica de Varredura foi efetuada no Laboratório de Microanálises da mesma Unidade/Instituição, os procedimentos seguiram as etapas representadas na figura 16.

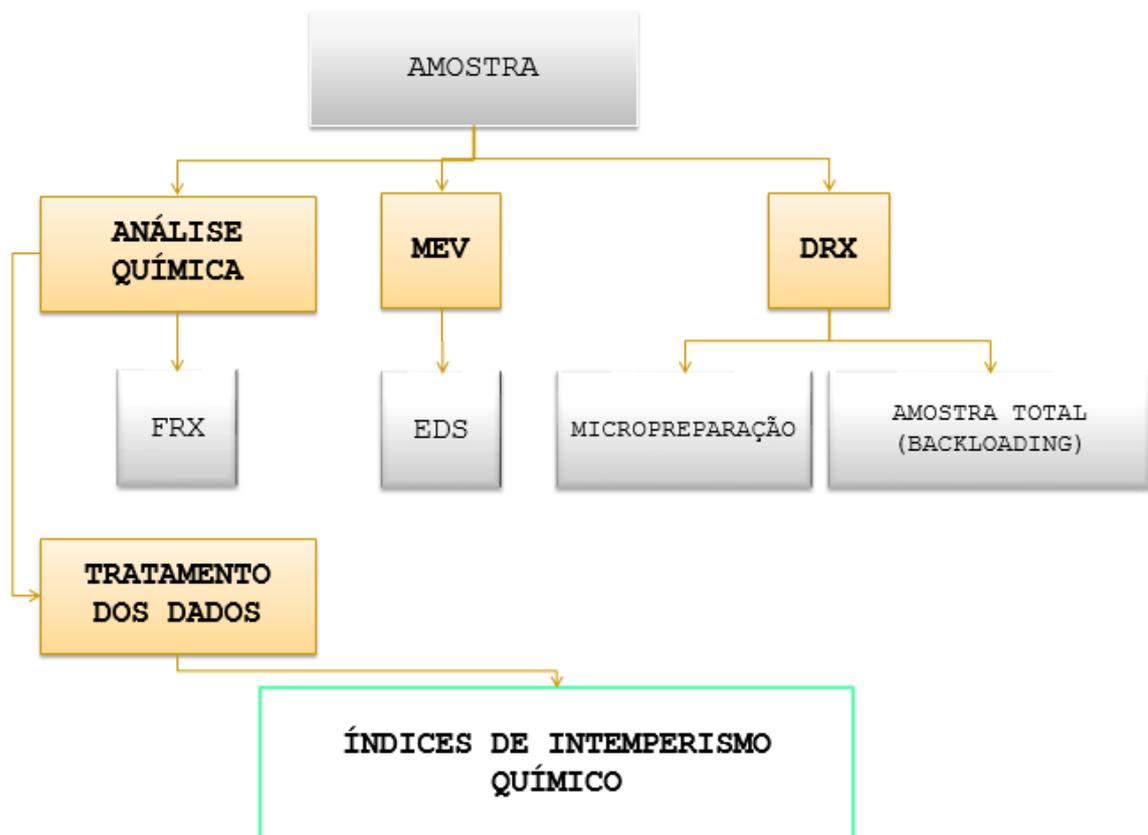


Figura 16 – Fluxograma de etapas da caracterização química e mineral.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 MINERALOGIA

#### 4.1.1 Análises Químicas

As 17 amostras, provenientes de processos industriais, analisadas nesta etapa foram apresentadas no capítulo “Materiais e Métodos”, item 3.1.2, e resumidas nas Tabelas 3 e 3.1.

Tabela 3 – Frações granulométricas da amostra de bauxita da alimentação do moinho SAG da Usina I, após a etapa de britagem.

Processo Unitário	N°	Amostra	Fração Granulométrica
<b>Alimentação do moinho SAG</b> (AL SAG)	01	06140243	<5" >1/2"
	02	06140244	<1/2" >20#
	03	06140245	<20# >150#
	04	06140246	<150# >400#
	05	06140247	<400# (37µm)
	06	06140248	<37µm >20µm
	07	06164951	<20µm >10µm
	08	06164952	<10µm >5µm
	09	06164953	<5µm
<b>Alimentação do espessador de concentrados</b> (AL ESP CON)	10	06170987	>20µm
	11	06170988	<20µm >10µm
	12	06170989	<10µm >5µm
	13	06170990	<5µm
<b>Alimentação do espessador de rejeitos</b> (AL ESP REJ)	14	06170991	>20µm
	15	06170995	<20µm >10µm
	16	06170996	<10µm >5µm
	17	06170997	<5µm

Tabela 3.1 – Frações granulométricas da amostra de bauxita da alimentação do moinho SAG da Usina I, após a etapa de britagem.

No	Amostra	Fração	(%)							
			ALAP	SIRE	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF	Total
01	6140243	<5" >1/2"	51,40	3,69	54,46	8,61	4,55	1,41	29,31	98,34
02	6140244	<1/2" >20#	48,07	5,16	52,40	10,41	5,73	1,27	28,24	98,04
03	6140245	<20# >150#	40,24	4,80	48,52	13,69	7,28	4,55	25,48	99,53
04	6140246*	<150# >400#	28,50	2,97	31,38	18,10	7,45	<b>17,00</b>	17,31	91,24
05	6140247	<400#	13,33	23,34	38,28	11,94	27,12	2,01	17,68	97,02

Factualmente, de modo histórico, a análise da fração [<150# - >400#] apresenta alto teor de titânio e não se consegue fechar o balanço dos óxidos totais. O propósito da pesquisa, além de examinar as melhores frações de recuperação de minério (gibbsita), com menor

proporção de argila (caulinita), era verificar o porquê de algumas faixas não apresentarem fechamento na análise química, o que tem relação direta com o objetivo principal da presente dissertação.

#### 4.1.2 Difração e fluorescência de Raios-X – DRX e FRX

Na figura 17, a seguir, estão os resultados de DRX e análises químicas, indicando claramente que há altos valores de  $ZrO_2$ , conexos ao zircão e  $TiO_2$  (relacionados a rutilo e anatásio).

06140246 (AL SAG I <150# >400#)			06140245 (AL SAG I <20# >150#)		
%	Acme	Hydro	%	Acme	Hydro
SiO <sub>2</sub>	6,96	7,45	SiO <sub>2</sub>	7,19	7,28
TiO <sub>2</sub>	17,05	17,00	TiO <sub>2</sub>	4,75	4,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,63	31,38	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48,08	48,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,72	18,10	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,59	13,69
CaO	0,02	-	CaO	<0.01	-
MgO	0,07	-	MgO	0,03	-
MnO	0,75	-	MnO	0,19	-
K <sub>2</sub> O	-	-	K <sub>2</sub> O	<0.01	-
Na <sub>2</sub> O	0,01	-	Na <sub>2</sub> O	0,01	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	-	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.01	-
LOI	17,2	17,31	LOI	25,7	25,48
<b>Total</b>	<b>94,46</b>	<b>91,24</b>	<b>Total</b>	<b>99,54</b>	<b>99,53</b>
Zr	386486 ppm		Zr	2381,1	
ZrO <sub>2</sub>	5,22 %		ZrO <sub>2</sub>	0,3%	
<b>Total</b>	<b>99,68</b>		<b>Total</b>	<b>99,84</b>	
Sc	125 ppm		Sc	55 ppm	

Figura 17 – Teores químicos da análise FRX e DRX das amostras de processos unitários, com destaque para a fração granulométrica <150# >400#, onde se concentra o zircão. Fonte: Norsk Hydro.

Constatou-se que o zircão da amostra 06140246 (AL SAG) apresentou U e Th, mas em valores considerados normais. A amostra 06140246 (AL SAG) apresentou alta concentração de gibbsita e baixa concentração de caulinita, e a explicação está na mineralogia acessória: a amostra apresenta teores relativamente elevados de hematita, que juntamente com goethita, explicam os valores mais elevados de  $Fe_2O_3$  (18,10%) dentre as amostras analisadas.

Os teores de  $\text{TiO}_2$  também são muito elevados: 17,0%, relacionados tanto ao anatásio, como ao seu polimorfo rutilo, facilmente identificado pela DRX e que normalmente não é identificado nas amostras de bauxita. Mas o fato mais curioso está relacionado a presença de grande quantidade do mineral zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ), que assim como o rutilo, também é um mineral acessório (resistato) comum encontrado em bauxitas, mas em pequenas quantidades. Nesta amostra, o pico principal deste mineral é muito intenso (figura 18), relativamente, evidenciando suas altas concentrações.

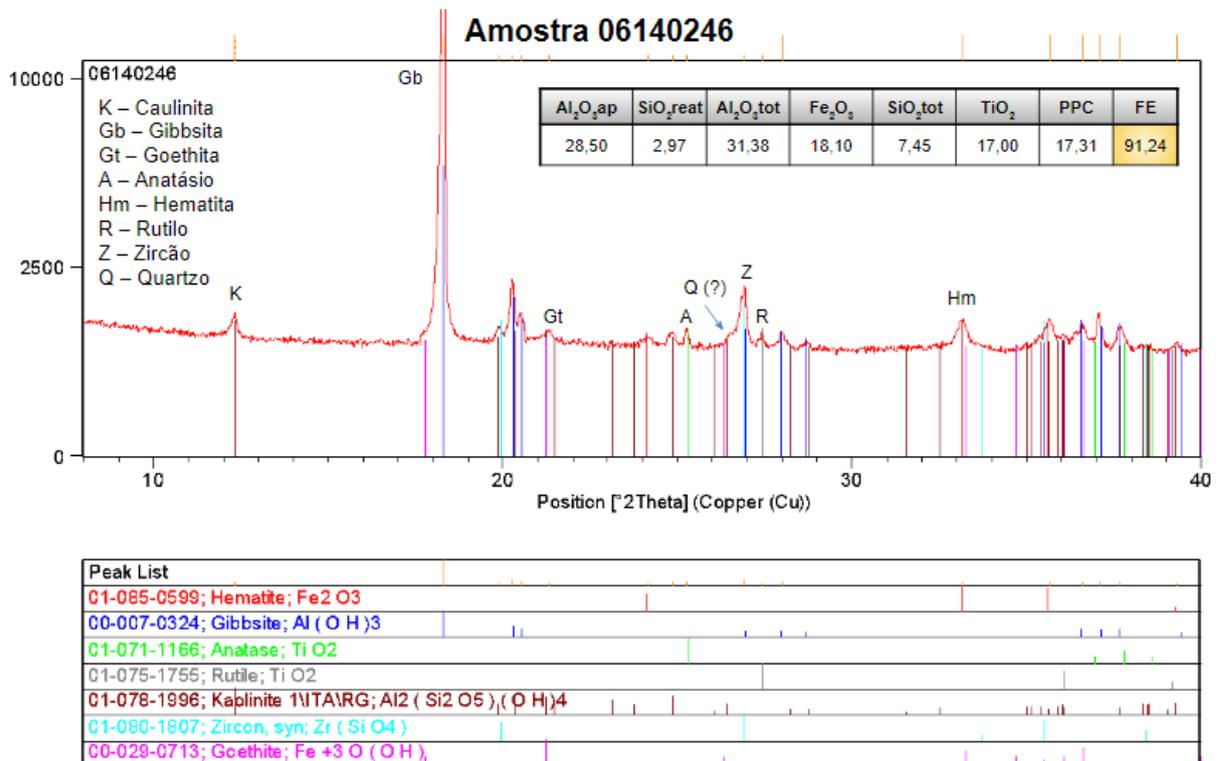


Figura 18 – DRX da amostra 06140246, com destaque para o acúmulo do zircão.  
Fonte: LCM (2021)

A grande diferença entre o resultado de sílica total (7,45%) e sílica reativa (2,97%), maior dentre as amostras analisadas, confirma o fato, mostrando que, já que não há quartzo na amostra, essa diferença (4,48%) deve estar relacionado a estrutura do zircão, já que não há outro silicato presente. Acredita-se que esta deva ser uma das razões para o não fechamento da análise, ou seja – estaria faltando a análise do Zr. Aparentemente, esta fração granulométrica está concentrando a maior parte dos minerais pesados da bauxita (zircão, anatásio, rutilo, parte da hematita, ilmenita pode estar presente, dentre outros)

#### 4.2 DISTRIBUIÇÃO DE U, Th E Zr NO PERFIL BAUXÍTICO DE MILTÔNIA 3

Nos horizontes BNC e BC onde ocorre a maior concentração de Zr, notou-se a imediata diminuição de urânio e tório; o inverso também pôde ser constatado, no horizonte LF onde o Zr diminuiu, os teores dos elementos U e Th aumentaram. Na distribuição do zircônio, foram verificados teores médios de 1550 ppm no horizonte BN, 1850 ppm no horizonte BNC, 900 ppm na LF, 1886 ppm na porção BC, 1380 ppm na BCBA e 1470 ppm na base do perfil (BA). Essa distribuição está representada na figura 19. Os outros elementos (U e Th) concentraram-se em quantidade inferior à 200 (ppm).

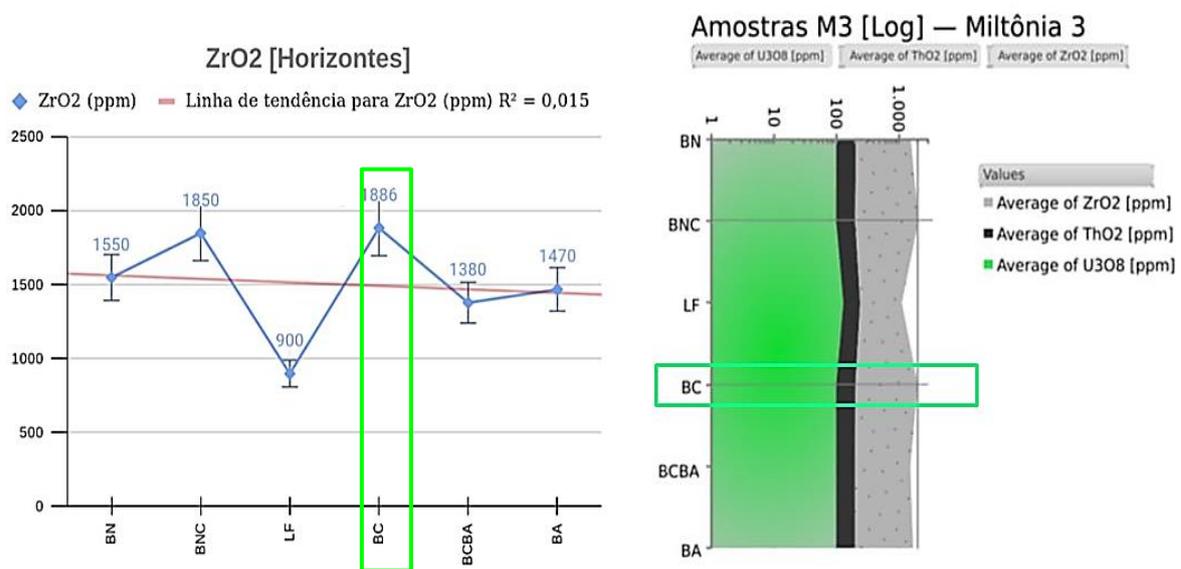


Figura 19 – Distribuição de U, Th e Zr no perfil bauxítico de Miltônia 3, baseado nos resultados de FRX. Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Soubiès (1991), é comum considerar o Zr como um elemento de grande estabilidade e praticamente imóvel no manto superficial de alteração, que se acumula residualmente nos perfis de intemperismo.

Soubiès (1991) afirma que a imobilidade aparente do Zr pode ser explicada, de um lado, pela fraca mobilidade do  $Zr^{4+}$ , dentro de uma larga variação de pH e Eh (Soubiès 1991 *apud* Levinson 1980, Brookins 1988), e, por outro lado, pelo fato do Zr, geralmente, ocorrer nas rochas concentrado em um único mineral, o zircão, que quando não está metamítico apresenta alta resistência à dissolução (Soubiès 1991 *apud* Goldich 1938, Milnes & Fitzpatrick 1989).

Durante muito tempo, os altos teores de Zr encontrados em bauxitas eram explicados única e exclusivamente pela presença de zircão, entretanto sabe-se que, em muitos casos, somente zircão, não poderia explicar a concentração de Zr encontrados em bauxitas. Os trabalhos de Degenhardt (1969) e Beneslavskii (1963) mostram que, nas bauxitas, o Zr, além de se concentrar no zircão, ocorre, também, provavelmente, como óxidos e hidróxidos coloidais, ou adsorvido na forma iônica em minerais secundários ou, ainda, substituindo isomorficamente o ferro e o alumínio em óxidos ou hidróxidos (Soubiès 1991).

Desta forma, vê-se que, além do zircão residual, poderiam ocorrer nos mantos de intemperismo, especialmente nas bauxitas, fases zirconiíferas secundárias, ainda mal identificadas, oriundas de diferentes portadores primários, cuja neoformação indicaria certa mobilização do Zr nos meios superficiais (Soubiès 1991).

Para avaliar a distribuição dos teores dos elementos maiores, realizou-se o cálculo das médias dos mesmos, analisados por FRX para cada horizonte do perfil da mina Miltônia 3, conforme demonstrado na tabela 4 e figura 20.

Tabela 4 – Teores médios de elementos maiores nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3. Elaboração própria baseada em dados cedidos pela Norsk Hydro.

		<b>MÉDIA (%)</b>					
		<b>BN</b>	<b>BNC</b>	<b>LF</b>	<b>BC</b>	<b>BCBA</b>	<b>BA</b>
<b>ÓXIDOS MAIORES</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	48,67	56,41	33,73	56,49	57,82	54,71
	<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,31	1,56	0,93	1,50	1,09	1,06
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	8,43	5,69	6,18	3,67	7,38	13,78
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16,69	6,82	40,96	8,64	3,98	3,17

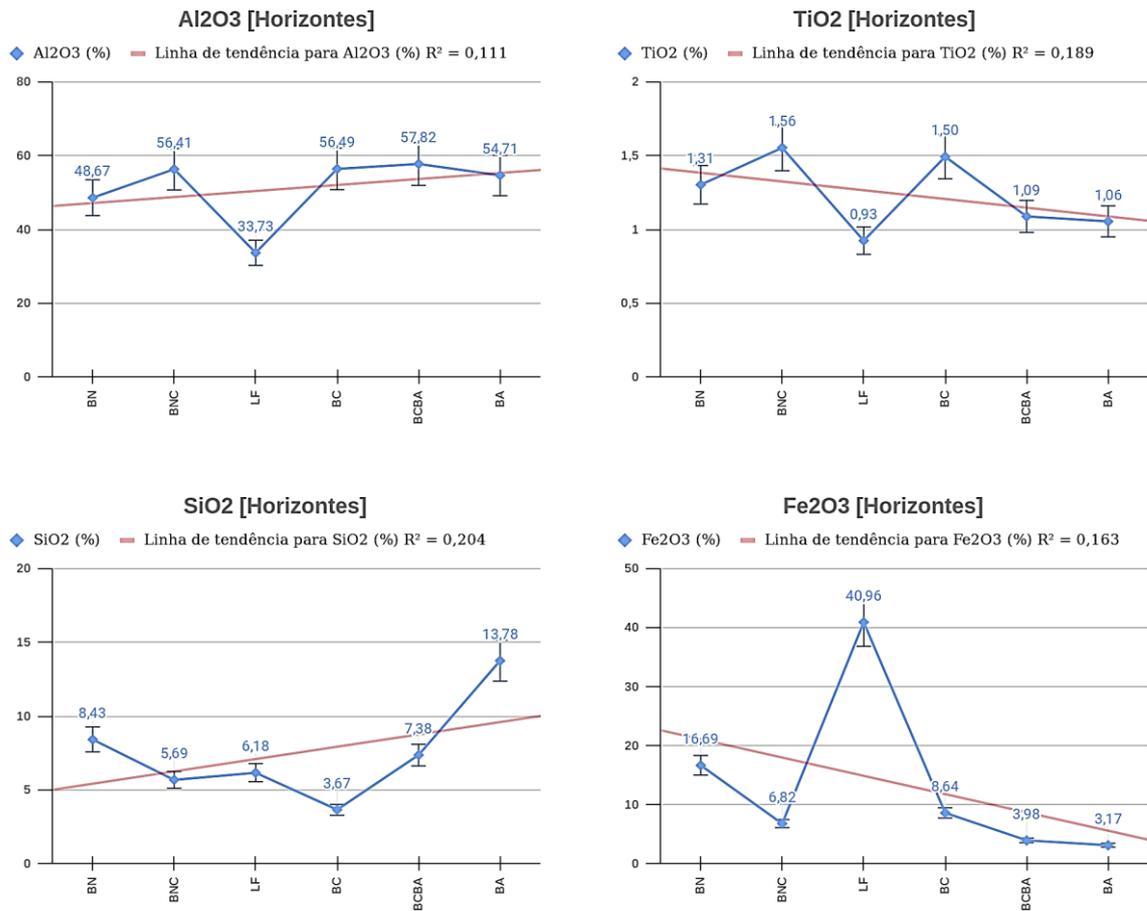


Figura 20 – Análise gráfica dos Teores médios de elementos maiores nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3. Elaboração própria baseada em dados cedidos pela Norsk Hydro.

Da mesma forma, para a averiguação da distribuição dos elementos-traço predominantes, prosseguiu-se com o cálculo das médias dos teores dos elementos analisados por FRX para cada horizonte do perfil litológico da Seção HIJ-231, conforme demonstrado na tabela 5 e figura 21; e, para efeito de validação, apenas foram considerados os resultados dos elementos dentro do Limite de Detecção (LD) do aparelho de fluorescência de Raio-X.

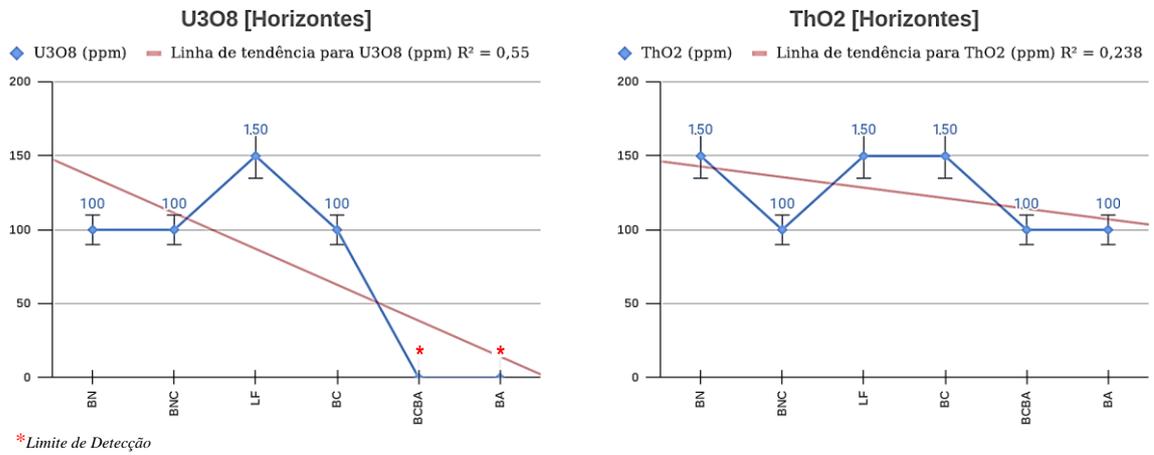
Tabela 5 – Teores médios (ppm) de elementos-traço e ETR nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3. Elaboração própria baseada em dados cedidos pela Norsk Hydro.

<b>ELEMENTOS-TRAÇO (ppm)</b>						
<b>ÓXIDOS</b>	<b>BN</b>	<b>BNC</b>	<b>LF</b>	<b>BC</b>	<b>BCBA</b>	<b>BA</b>
<b>ThO2</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>U3O8</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>LD</b>	<b>LD</b>
<b>ZrO2</b>	<b>1550</b>	<b>1850</b>	<b>900</b>	<b>1886</b>	<b>1380</b>	<b>1470</b>
P2O5	227	187	340	314	334	283
MnO	200	250	200	350	400	350
Co	60	LD	73	55	LD	LD
WO3	128	167	136	176	233	200
BaO	200	200	150	250	250	300
Cr2O3	200	200	450	200	150	0
PbO	150	150	250	150	150	150
SnO2	300	200	300	250	250	150
Cu	100	150	150	100	LD	LD
ZnO	150	LD	250	100	LD	LD
NiO	150	100	150	150	100	100
V2O5	550	300	1225	250	150	150

<b>ETR (ppm)</b>						
<b>ÓXIDOS</b>	<b>BN</b>	<b>BNC</b>	<b>LF</b>	<b>BC</b>	<b>BCBA</b>	<b>BA</b>
Nd2O3	250	150	250	200	200	150
CeO2	150	200	200	150	150	100
Gd2O3	100	100	LD	150	150	100
La2O3	LD	LD	LD	100	150	LD
Sm2O3	150	150	LD	150	150	150
Y2O3	150	150	100	150	150	100

## Actinídeos



## Metais de Transição

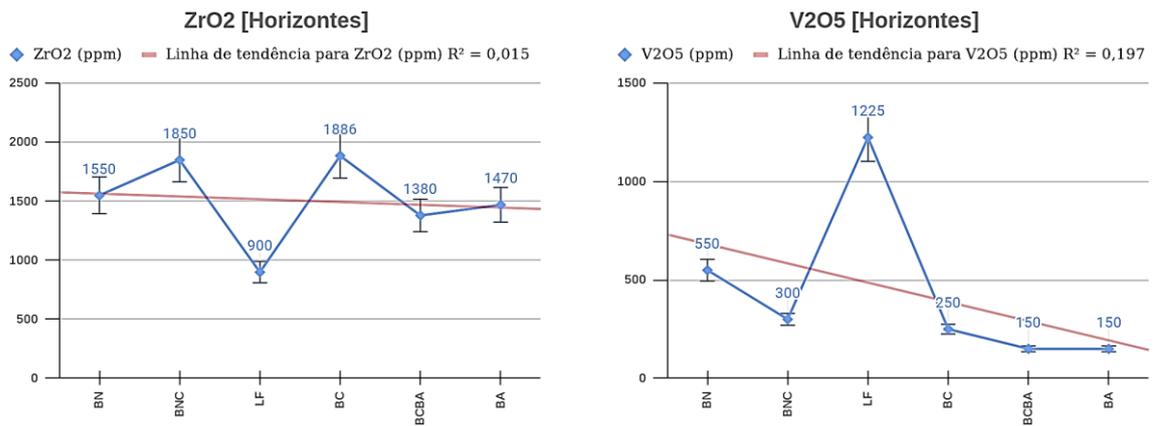


Figura 21 – Análise gráfica dos Teores médios de elementos traços nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3. Elaboração própria baseada em dados cedidos pela Norsk Hydro.

Através da análise de Correlação (tabela 6), ficou demonstrado que o Zr tem forte afinidade com os ETR, Gd e Sm, e moderada com Y; em relação ao Th, este apresenta correlação muito forte com os elementos Co, Cu e Ni, e forte correlação com U e Nd; no caso do U, este também mostrou forte correlação com Cr, Cu, Zn, Ni e V.

Os elementos-traços verificados através da análise de FRX, são, segundo a classificação de Goldschmidt, predominantemente litófilos — U, Th, Zr, Sm, La, Nd, Pr, Ce, Gd, Y, Mn, W, Ba, Cr e V; existem também elementos pertencentes aos grupos dos siderófilos (P, Co, Sn, Ni) e dos calcófilos (Pb, Cu, Zn). Em relação à classificação de terras-raras, os elementos determinados nas análises fazem parte dos 02 grupos (ETRP e ETRL) [figura 22], e estão divididos da seguinte maneira — ETR Pesados (Y e Gd) e ETR Leves (La, Ce, Pr, Nd e Sm).

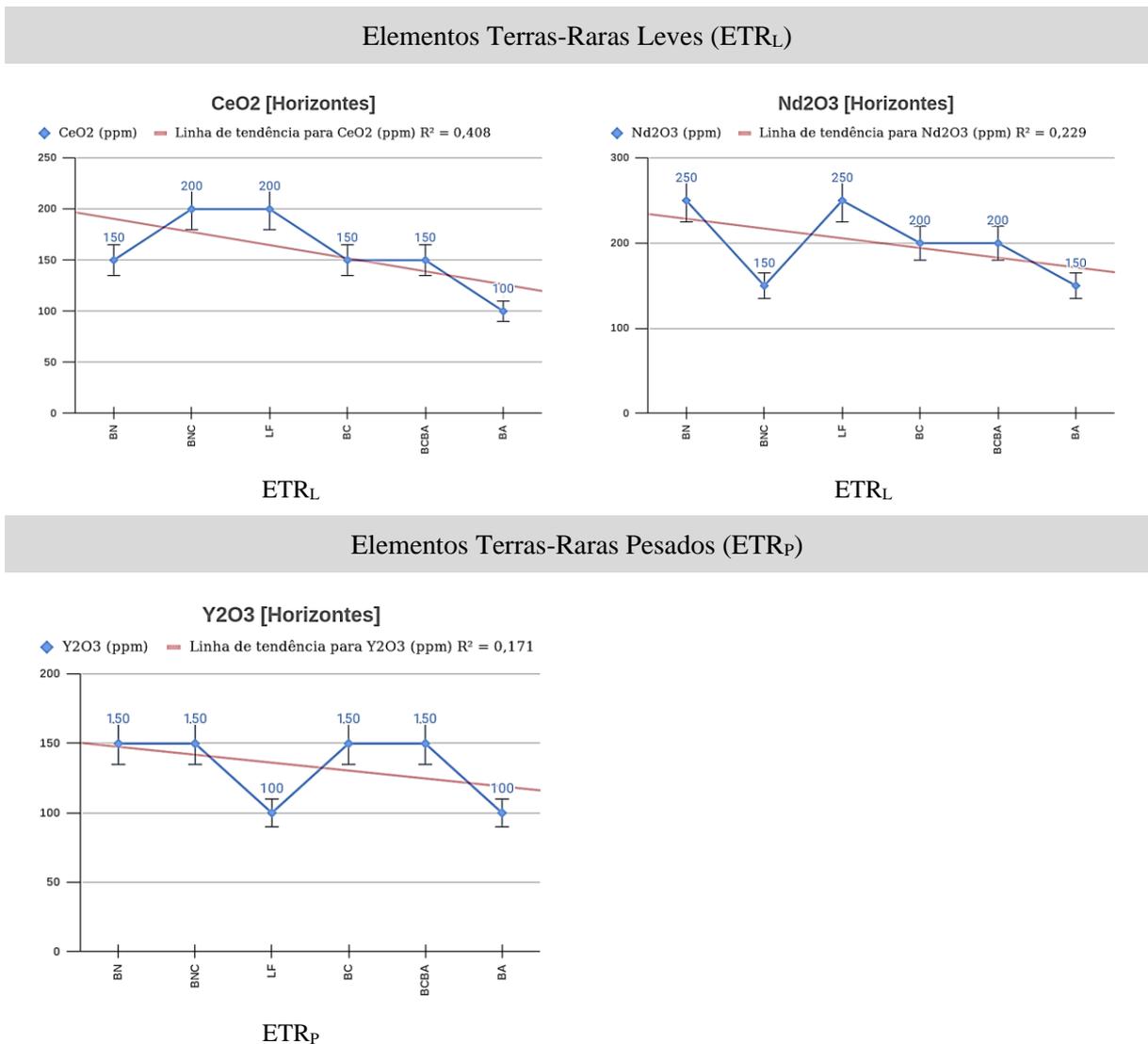


Figura 22 – Teores médios de elementos terras-raras (ETR) nos diferentes horizontes da mina Miltônia 3. Fonte: **Adaptado** de Norsk Hydro.

Tabela 6 – Análise de Correlação dos Teores médios de elementos traços nos diferentes horizontes da litografia da mina Miltônia 3.  
Elaboração própria baseada em dados cedidos pela Norsk Hydro.

Correlations	P2O5	MnO	Co	Gd2O3	Sm2O3	ThO2	WO3	BaO	Cr2O3	PbO	SnO2	Y2O3	Cu	La2O3	Nd2O3	U3O8	ZnO	NiO	V2O5	ZrO2	CeO2	
P2O5	1,00																					
MnO	0,42	1,00																				
Co	0,27	-0,60	1,00																			
Gd2O3	-0,09	0,74	-0,48	1,00																		
Sm2O3	-0,47	0,52	-0,59	0,89	1,00																	
ThO2	0,23	-0,53	0,99	-0,33	-0,45	1,00																
WO3	0,34	0,94	-0,77	0,63	0,46	-0,74	1,00															
BaO	0,10	0,83	-0,61	0,70	0,70	-0,52	0,74	1,00														
Cr2O3	0,26	-0,64	0,72	-0,69	-0,85	0,63	-0,62	-0,92	1,00													
PbO	0,47	-0,52	0,59	-0,89	-1,00	0,45	-0,46	-0,70	0,85	1,00												
SnO2	0,26	-0,51	0,81	-0,31	-0,49	0,78	-0,56	-0,73	0,77	0,49	1,00											
Y2O3	-0,38	0,15	-0,11	0,71	0,63	0,00	0,10	0,00	-0,13	-0,63	0,22	1,00										
Cu	0,33	-0,60	0,99	-0,55	-0,68	0,96	-0,75	-0,65	0,78	0,68	0,79	-0,19	1,00									
La2O3	0,55	0,77	-0,20	0,69	0,31	-0,14	0,70	0,36	-0,16	-0,31	0,11	0,49	-0,21	1,00								
Nd2O3	0,35	-0,52	0,85	-0,41	-0,55	0,82	-0,58	-0,64	0,69	0,55	0,96	0,00	0,84	0,00	1,00							
U3O8	-0,14	-0,81	0,78	-0,60	-0,60	0,75	-0,87	-0,86	0,85	0,60	0,63	0,00	0,80	-0,43	0,55	1,00						
ZnO	0,31	-0,69	0,95	-0,71	-0,79	0,88	-0,78	-0,74	0,84	0,79	0,80	-0,31	0,97	-0,32	0,87	0,79	1,00					
NiO	0,23	-0,53	0,99	-0,33	-0,45	1,00	-0,74	-0,52	0,63	0,45	0,78	0,00	0,96	-0,14	0,82	0,75	0,88	1,00				
V2O5	0,25	-0,76	0,75	-0,91	-0,93	0,63	-0,72	-0,85	0,90	0,93	0,67	-0,47	0,81	-0,45	0,72	0,77	0,91	0,63	1,00			
ZrO2	-0,58	0,28	-0,33	0,74	0,82	-0,18	0,15	0,42	-0,53	-0,82	-0,40	0,69	-0,41	0,16	-0,54	-0,13	-0,57	-0,18	-0,73	1,00		
CeO2	-0,16	-0,59	0,32	-0,49	-0,54	0,24	-0,47	-0,89	0,83	0,54	0,49	0,17	0,37	-0,17	0,30	0,76	0,43	0,24	0,60	-0,17	1,00	

ELEMENTOS-TRAÇO (ppm)

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados das análises químicas e mineralógicas das amostras provenientes da mina Miltônia 3, tanto da bauxita in natura, como das suas frações granulométricas, após moagem autógena, demonstram que existe relação entre os altos valores de  $ZrO_2$  e  $TiO_2$  verificados e os minerais acessórios – zircão, rutilo e anatásio, presentes na bauxita.

Ficou evidente que os valores relativamente elevados de U e Th encontrados, estão ligados ao zircão, que se concentra, preferencialmente na fração granulométrica <150# >400# (da amostra da alimentação do moinho SAG da Usina I), e, a explicação para isso é que esta se trata da fração granulométrica preferencial de acumulação de minerais pesados (ZTRE – zircão, turmalina, rutilo; estaurolita, dentre outros) no ambiente sedimentar (sedimentos e rochas sedimentares).

Essa dissertação fez parte do projeto "Desenvolvimento e otimização de métodos prospectivos e de controle de beneficiamento de bauxitas gibbsíticas" recebendo financiamento do CNPQ através do projeto nº: 402427/2016-5, Edital Universal 01/2016, faixa C, com vigência: de 08/2017 a 07/2020

## REFERÊNCIAS

- Antoniassi J.L. 2010. *A Difração de Raios-X com o método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 111p.
- Aranha L. D. F., Lima H. P., Souza J. D., Makino R. K., Figueiras A. J. M. 1990. Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *In: Raja Gabaglia G. P. & Milani E. J. Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobras, p, 221-233.
- Araújo Kirley, Sommer Margot Guerra, Medeiros Manuel, Girnos Emília, Schmidt Isabela Degani. 2011. Lenhos de coníferas do Mesocretáceo do norte do Maranhão, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*. **14**. 29-38. 10.4072/rbp.2011.1.03.
- Barbosa G.V. *et al.* 1973. *Levantamento de Recursos Naturais. Projeto RADAM*. 2. Folha SB 23 Teresina e parte da folha SB. 24 Jaguaribe.
- Calaf J.M.C. 2000. *Evolução geológica no Cenozóico da região entre Açailândia (MA) e Ligação (PA)*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 112 p.
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*. **21**(2):146-160.
- Dennen W.H. & Norton H.A. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. *Economic Geology*. **72**(1):82-89.
- Erdócia F.A.B. 2011. *Difração de Raios X em Minerais de Bauxita e Análise Através de Refinamento pelo Método de Rietveld*. MS Dissertation, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 80p.
- 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*. p.123-124.
- Horbe A.M.C. & Costa M.L. 1999. Geochemical evolution of a lateritic Sn-Zr-Th-Nb-Y-REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas-Brasil. *Jour. Geochem. Explor.*, 66:339-351.
- Kotschoubey B. & Truckenbrodt, W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas do distrito de Paragominas – Açailândia (estados do Pará e Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **11**:193-202.
- Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1994. Evidências de bauxitização tardia no nordeste do estado do Pará. *In: SBG/Norte, Simp. Geol. Amaz., 4, Anais[...]*, p. 269-271.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1997. Bauxite deposits of Paragominas. *In: A. Carvalho, B. Boulangé, A.J. Melfi & Y. Lucas (Eds.) Brazilian Bauxites*. USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo, p. 75-106.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1987. Phases and zonality of the bauxitic alteration in the northeast of the State of Pará (Brazil). *Travaux ICSOBA*, **16**(17):115- 127.

- Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.S., Azevedo C.H.D. 2005b. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. *In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B. W. (org.). Caracterização dos depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. 1 ed. Brasília, DF: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, v. 1, p. 691-782.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W. Calaf J. M. C. 2005a. Evolução Geológica da porção meridional da província bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (nordeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará e extremo oeste de Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, **35**(2):263-272.
- Melo C.C.A., Oliveira K.S., Angélica R.S., Paz S.P.A. 2017. *Análise de agrupamentos associada a difratometria de raios-x: uma classificação mineralógica prática de bauxitas e seus produtos de digestão Bayer*. Holos, Natal, (Online), **6**, p. 32-42. <https://doi.org/10.15628/holos.2017.6387>
- Mendes C. 2018. *Comunidades de Barcarena protestam na porta da Hydro contra os crimes da empresa*. Disponível em: <https://ver-o-fato.com.br/comunidades-de-barcarena-protestam-na/>. Acesso em: 27/12/2019.
- Mendes A.C. & Truckenbrodt W. 2006. *Minerais pesados em depósitos albianos do Grupo Itapecuru, borda leste da Bacia de São Luís-Grajaú (MA)*. (Relatório final de iniciação científica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 41p.
- Mingoti S. A. 2005. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada – Uma Abordagem Aplicada*. Belo Horizonte: Editora. UFMG 300p.
- MME. setembro de 2009. *Perfil da Mineração em bauxita*. Brasília, Secretaria de Geologia Minas, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia-MME.
- Nascimento S. N & Goés A. M. 2007. *Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil*. *Revista Brasileira de Geociências*. **37**(1): 50-63.
- Oliveira K.S. 2015. *Análise mineralógica por difratometria de raios-x e método de análise de agrupamento (cluster analysis) como critério para individualização de horizontes bauxíticos*. Dissertação de Mestrado, PPGG-UFPA, 98 p.
- Peixoto S.F. & Horbe A.M.C. 2008. Bauxitas do nordeste do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, **38**(2):406-422.
- Petri S. & Fúlforo, V.J. 1983. *Geologia do Brasil – Fanerozóico*. São Paulo, EDUSP, 613p.
- Picanço F.E.L, Silva Neto D.C. e, Calado W.M., Almeida K.R., Quadros C.R.R., Rabelo S.Â. 2013. *Amostragem em diferentes malhas de sondagem para minério de Bauxita – Mina de Miltônia 03 - Paragominas – PA*. In. Simpósio de Geologia da Amazônia, 13, Anais, p.645-647.
- Santos W.M. 2011. *Mineralogia e Geoquímica da Bauxita Derivada do Anortosito, Barro Alto, Goiás*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.142p.
- Silva A.J.P., Lopes R.C., Vasconcelos A.M., Bahia R.B.C. 2003. Bacias sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In: Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidotti R. M.,

Gonçalves J. H. (eds). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília,DF, Serviço Geológico do Brasil-CPRM, p. 55-85.

Silva F.A.N.G., Barbato C.N., Santos R.D., Almeida D.S.G., Sampaio J.A., Medeiros M.E., Garrido F.M.S. 2012. *Mechanochemical Activation of Bauxite*. Light Metals (NewYork), 2012, 27-32p.

Soubiès Francois, *et al.* "Mobilidade do zircônio na bauxitização de rochas alcalinas do maciço de Poços de Caldas, Minas Gerais." *Revista Brasileira de Geociências* 21.1 (1991): 17-22.

Truckenbrodt W., Nascimento M.S., Goés A.M. 2005. Distribuição de minerais pesados em arenitos de formações fanerozóicas no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. *In: Horbe A. M. C. & Souza V. da S. Contribuições à geologia da Amazônia*. Manaus, SBG. Núcleo Norte. p.180-189.

U.S. Geological Survey, 2019. *Mineral commodity summaries 2019*: U.S. Geological Survey, 200 p., Disponível em: <https://doi.org/10.3133/70202434>. Acesso em: 13 out. 2020.

Vasquez M. L. & Travassos L., 2016. *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*. Cprm.gov.br. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10443>. Acesso em: 13 out. 2020.

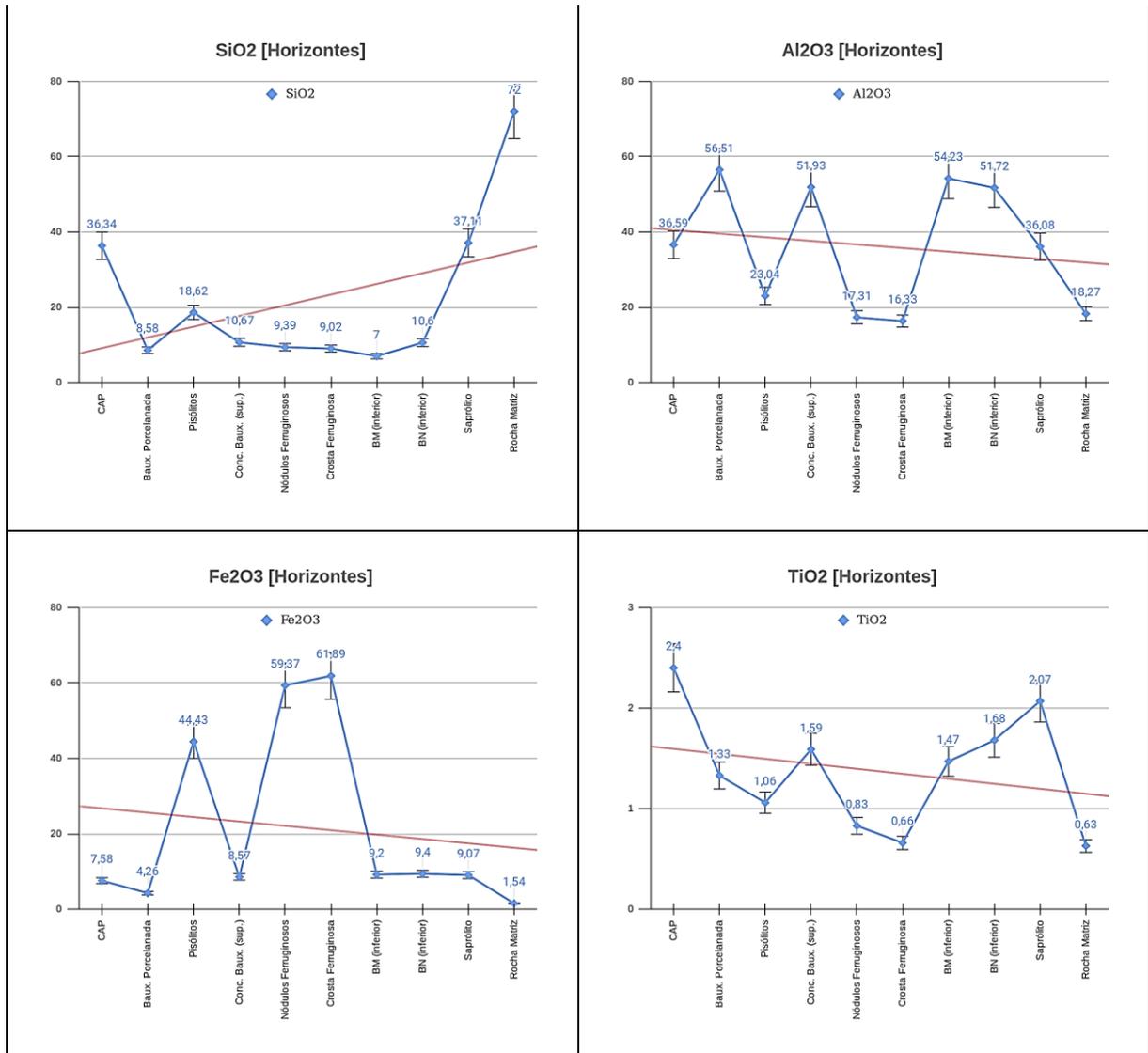
Xavier C.L. 2012. Relatório Estudos Setoriais: Alumínio. *Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de Restrições e perspectivas tecnológicas – Alumínio*. Ribeirão Preto-SP., 77p.

## APÊNDICE A – TEORES MÉDIOS DE ÓXIDOS MAIORES: ELEMENTOS-TRAÇO E ETR<sub>P,L</sub>

Teores médios de elementos maiores nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.

<b>Elementos Maiores (%)</b>	<b>Rocha Matriz [N=4]</b>	<b>Saprólito [N=21]</b>	<b>BN (inferior) [N=13]</b>	<b>BM (inferior) [N=22]</b>	<b>Crosta Ferruginosa [N=9]</b>	<b>Nódulos Ferruginosos [N=15]</b>	<b>Conc. Baux. (superiores) [N=6]</b>	<b>Plsólitos [N=24]</b>	<b>Baux. Porcelanada [N=19]</b>	<b>C.A.P [N=31]</b>
SiO <sub>2</sub>	72	37,11	10,6	7	9,02	9,39	10,67	18,62	8,58	36,34
TiO <sub>2</sub>	0,63	2,07	1,68	1,47	0,66	0,83	1,59	1,06	1,33	2,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,27	36,08	51,72	54,23	16,33	17,31	51,93	23,04	56,51	36,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,54	9,07	9,4	9,2	61,89	59,37	8,57	44,43	4,26	7,58
MnO	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
MgO	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
K <sub>2</sub> O	0,06	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,04	0,03	0,06	0,07	0,06	0,01	0,05	0,02	394,5
PF	7,18	15,22	26,1	27,72	11,53	12,54	26,82	12,35	29	16,67
TOT/C	0,05	0,18	0,04	0,06	0,07	0,1	0,06	0,13	0,1	0,32
TOT/S	0,01	0,03	0,02	0,02	0,06	0,06	0,02	0,05	0,03	0,05
<b>Total</b>	<b>99,87</b>	<b>99,90</b>	<b>99,65</b>	<b>99,83</b>	<b>99,69</b>	<b>99,72</b>	<b>99,73</b>	<b>99,79</b>	<b>99,91</b>	<b>100,03</b>

Análise gráfica dos Teores médios (%) de elementos maiores nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.



\*Elementos padrão do controle de processo da Indústria de Al: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e TiO<sub>2</sub>,

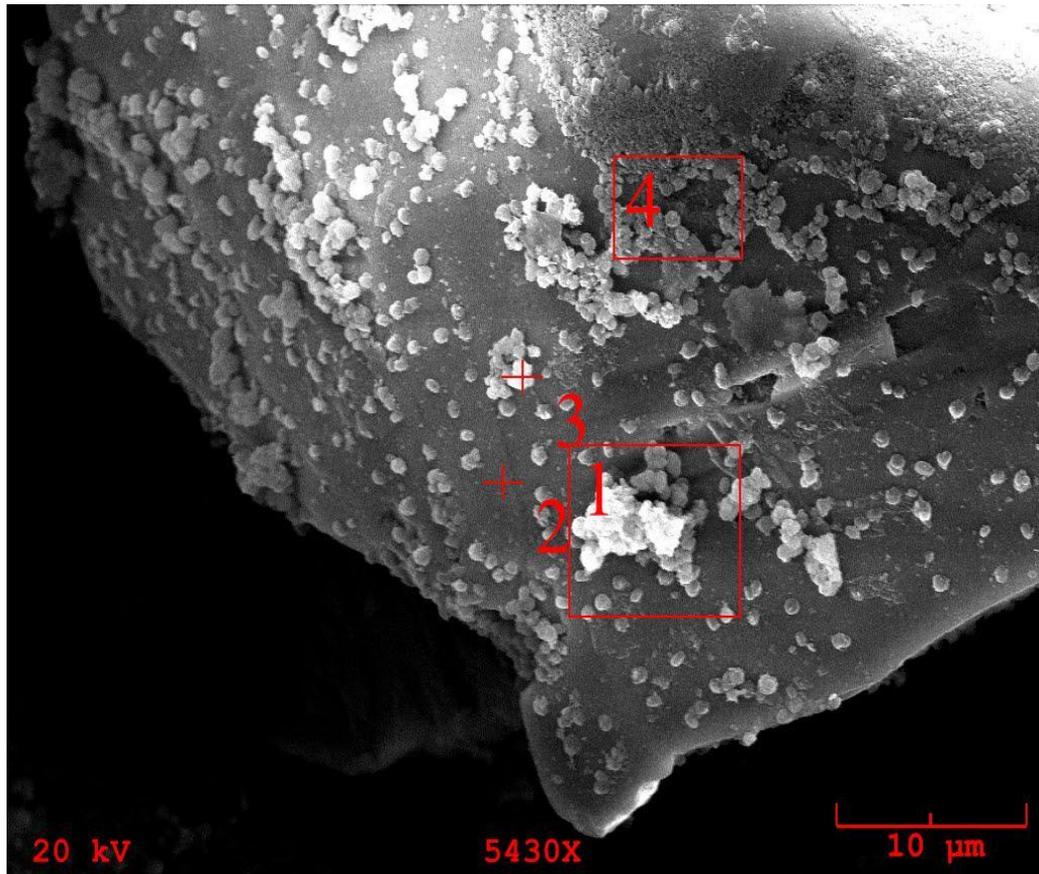
Teores médios de elementos-traço nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.

Elementos Traço (ppm)	Rocha Matriz Alterada [N=3]	Saprólito [N=21]	BN (inferior) [N=13]	BM (inferior) [N=22]	Crosta Ferruginosa [N=9]	Nódulos Ferruginosos [N=15]	Conc. Baux. (superiores) [N=6]	Pisólitos [N=24]	Baux. Porcelanada [N=19]	CAP [N=31]
TiO <sub>2</sub>	6300	20700	16800	14700	6600	8300	15900	10600	13300	23000
Nb	16	51	42	37	17	21	37	26	33	57
Zr	749	1681	1356	1041	508	571	1219	763	963	1565
Hf	21	47	26	29	14	16	33	21	26	44
Y	19	41	34	28	13	14	30	17	21	37
Th	20	52	44	43	57	56	39	67	35	56
U	2	5	4	4	3	3	4	3	3	5
Sc	6	16	11	10	12	16	12	15	10	16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	300	400	300	500	700	600	<200	500	<200	400
Ba	20	61	39	70	37	20	17	19	20	28
Sr	11	49	33	48	14	16	19	14	16	30
Ga	19	48	54	51	53	55	48	65	54	56
V	25	162	169	163	1445	1216	164	960	95	160
As	<1	1	1	<1	10	8	2	21	2	1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	120	90	130	310	400	140	500	200	210
Pb	3	9	7	7	30	24	6	20	4	4
Cu	1	4	4	2	6	11	4	7	2	2
Mo	<1	<1	<1	<1	3	3	<1	7	<1	<1
Ni	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	2
Zn	1	4	3	2	4	6	3	4	1	5
<b>Total</b>	7553	23452	19017	16865	9836	11356	17677	13629	14785	25678

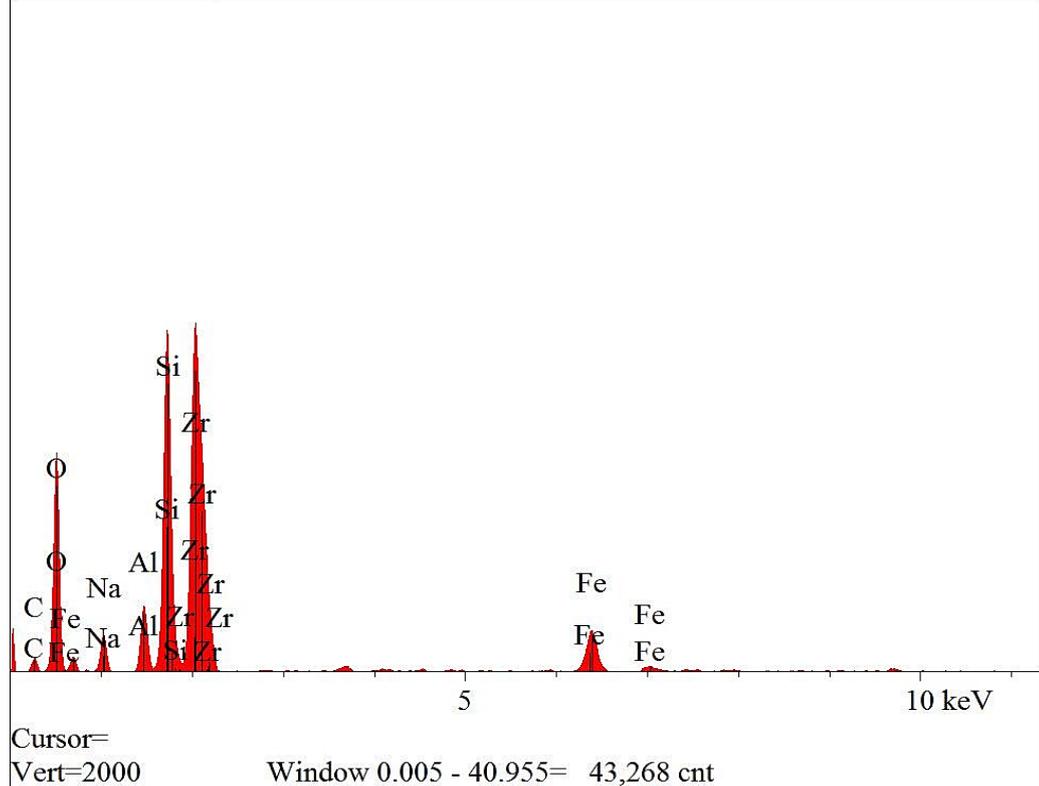
Teores médios de ETR nos diferentes horizontes do manto laterítico do domínio meridional. Adaptado de Kotschoubey, 2005.

ETR (ppm)	Rocha Matriz Alterada [N=3]	Saprólito [N=21]	BN (inferior) [N=13]	BM (inferior) [N=22]	Crosta Ferruginosa [N=9]	Nódulos Ferruginosos [N=15]	Conc. Baux. (superiores) [N=6]	Pisólitos [N=24]	Baux. Porcelanada [N=19]	CAP [N=31]
La	32,23	71,91	64,39	75,7	23,27	21,71	34,84	20,54	24,34	39,59
Ce	57,73	109,41	103,92	126,3	29,24	27,11	43,43	31,48	40,16	68,33
Nd	13,43	23,78	16,38	24	8,04	8,67	9,27	8,17	8,83	16,14
Sm	2,03	3,61	2,35	2,99	1,33	1,56	1,87	1,47	1,48	2,72
Eu	0,44	0,75	0,48	0,58	0,28	0,32	0,43	0,3	0,31	0,59
Gd	1,75	3,71	2,52	2,49	1,27	1,47	2,39	1,51	1,57	3,06
Dy	2,66	5,6	4,44	3,75	1,86	2,09	4,01	2,39	2,84	4,95
Ho	0,62	1,33	1,07	0,82	0,41	0,47	0,94	0,55	0,67	1,16
Er	2,24	4,67	3,82	3,03	1,42	1,67	3,3	1,93	2,36	4,11
Yb	2,62	5,88	4,83	3,87	1,9	2,13	4,32	2,51	3,14	5,28
Lu	0,48	1	0,84	0,65	0,31	0,35	0,71	0,42	0,53	0,88
<b>Total</b>	116,23	231,65	205,04	244,18	69,33	67,55	105,51	71,27	86,23	146,81

## APÊNDICE B – MICROGRAFIAS MEV-EDS



LV-BC H2O Img2-1



Micrografia MEV-EDS de amostra bauxítica da Mina Miltônia 3.