



**Petrografia e Geocronologia da Monazita Hidrotermal do Pertita  
Granito do Complexo Intrusivo Lavras do Sul/RS.**

Porto Alegre, 2012

**CAMILA DIDIO RODRIGUES CHAVES**

**Petrografia e Geocronologia da Monazita Hidrotermal do Pertita  
Granito do Complexo Intrusivo Lavras do Sul/RS.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadores:** Profa. Dra. Carla Cristine Porcher

Prof. Dr. André Sampaio Mexias

Porto Alegre, 2012

Chaves, Camila Didio Rodrigues

Petrografia e geocronologia da monazita hidrotermal do  
Pertita Granito do Complexo Intrusivo Lavras do Sul/RS. / Camila  
Didio Rodrigues Chaves - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2012.  
95 f. il.

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. - Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto  
Alegre, RS - BR, 2012.

Orientadora: Carla Cristine Porcher

Coorientador: André Sampaio Mexias

1. Geocronologia. 2. U-Th-Pb. 3. Monazita Hidrotermal.
4. LA-MC-ICPMS. 5. Complexo Intrusivo Lavras do Sul. I. Título.

---

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Geociências - UFRGS  
Renata Cristina Grün CRB 10/1113

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**Petrografia e Geocronologia da Monazita Hidrotermal do Pertita Granito do Complexo Intrusivo Lavras do Sul/RS.**", elaborado por "CAMILA DIDIO RODRIGUES CHAVES", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Lídia Medeiros Vignol

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ana Maria Ribeiro Althoff

## DEDICATÓRIA

*Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus pais, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. E dedico ao meu amor, Maiquel Kochhann Lunkes, por seu incentivo, confiança e amor incondicional.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, que sempre me apoiou e me incentivou para estudar. Obrigada pelos lanches pra levar pra faculdade. E obrigada por todos os dias, às 17h, me ligar para perguntar se eu já estava chegando em casa! Obrigada ao meu pai, por nunca deixar nos faltar nada.

Agradeço ao Maique, meu amor, a minha alegria. Por sempre me apoiar em tudo o que é importante para mim. Por sempre se fazer presente, principalmente neste último ano, mesmo estando tão longe. Esta conquista também é tua. Obrigada por ser a melhor coisa que já aconteceu na minha vida.

Agradeço ao Seu Adolar e a Dona Ineis, por me acolherem tão bem em sua casa. Obrigada Dona Ineis por sempre falar da importância de se estudar. E obrigada aos dois, pelo filho de vocês.

Agradeço a minha orientadora e amiga, professora doutora Carla Cristine Porcher, pelos ensinamentos durante o desenvolvimento do trabalho. Por sempre estar disposta a compartilhar o seu conhecimento. Obrigada pela sua confiança, incentivo e PACIÊNCIA.

Agradeço ao doutorando Leonardo Gruber por sempre estar disposto a sanar as minhas dúvidas e, principalmente, me ajudar nos momentos de sufoco com o temático.

Agradeço ao geólogo Sergio Luiz Junges por ter me ensinado as técnicas fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos colegas dessa maravilhosa jornada que foi a Geologia.

**EPÍGRAFE**

*"A ciência serve para nos dar uma idéia  
de quão extensa é a nossa ignorância."  
Félicité Robert de Lamennais*

## RESUMO

Monazitas hidrotermais do pertita granito, zona periférica do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, foram analisadas com o objetivo de determinar a idade do evento no qual foram geradas e, também montar um protocolo para análise de monazita em *mounts* convencionais (*i.e.* grãos montados em pastilhas de resina) utilizando o LA-MC-ICPMS Neptune do LGI-IGeo/UFRGS. Para a correção das análises foi utilizado o padrão internacional de monazita 44069. O evento hidrotermal no qual foram geradas é responsável por importantes ocorrências de ouro e cobre sobre as rochas do complexo, onde formou faixas alteradas concentradas preferencialmente no pertita granito periférico. A alteração nessa rocha é caracterizada pela transformação do anfibólio ferro-edenítico em clorita ferrosa + quartzo + calcita + anatásio + monazita. Macroscopicamente pode ser distinguida de outros estágios pelo avermelhamento do K-feldspato e embranquiçamento do quartzo causado por trilhas de inclusões fluidas. Essa alteração caracteriza o estágio de propilitização que circunda as rochas mais fortemente alteradas e mineralizadas em Au e Cu, portanto registra em si a distante influência térmica e do fluido. A idade  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  calculada para as monazitas hidrotermais foi de  $591\pm 29$  Ma, coerente com o esperado para a região, porém com um erro analítico elevado. Além disso, dados indicam serem ricas em Ce, Nd e La, com concentrações extremamente baixas de U e Th quando comparadas a monazitas de alto grau. As análises de padrão forneceram uma idade  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  de  $454\pm 32$  Ma. Os resultados obtidos permitiram um aprimoramento do protocolo para análise U-Th-Pb em monazitas no LGI, além de contribuir com novos dados geocronológicos do hidrotermalismo da região

**Palavras-Chave:** U-Th-Pb, Monazita Hidrotermal, Geocronologia, LA-MC-ICPMS, Complexo Intrusivo Lavras do Sul.



## ABSTRACT

Hydrothermal monazites of perthitic granite, peripheral zone of Lavras do Sul Intrusive Complex (LSIC) were analyzed in order to determine the age at which the event they were generated, and also to set up a protocol for monazite analysis in conventional mounts (i. e. grains mounted on pads resin) using the LA-MC-ICPMS Neptune LGI-IGeo/UFRGS. For analysis correction was used monazite standard 44069. The hydrothermal event in which monazite was generated was responsible for important occurrences of gold and copper on the rocks of this complex, generating altered bands preferentially concentrated in peripheral perthitic granite. The alteration in this rock is characterized by the transformation of amphibole to Fe-chlorite + calcite + quartz + anatase + monazite. Macroscopically it can be distinguished from other alteration stages by reddening of K-feldspar and whitish of quartz caused by fluid inclusion trails. This change characterizes the propylitic stage, surrounding rocks more strongly altered and mineralized, therefore registers itself to distant influence thermal and fluid. The  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  calculated age for hydrothermal monazites was  $591 \pm 29$  Ma, consistent with expectations for the region, but with a high analytical error. Furthermore, data indicate they are rich in Ce, La and Nd, with extremely low concentrations of U and Th when compared to high grade monazites. The standard analysis provided a  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  age of  $454 \pm 32$  Ma. The results could provide an improvement method of U-Th-Pb dating monazite in LGI and contribute new geochronological data for the region hydrothermalism.

**Key words:** U-Th-Pb, Hydrothermal Monazite, Geochronology, LA-MC-ICPMS, Lavras do Sul Intrusive Complex.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa rodoviário simplificado do estado do Rio Grande do Sul (adaptado de DNIT, 2002) e localização na América do Sul. ....20
- Figura 2 - (a) Estrutura cristalina da monazita. Os poliedros de ETR são sombreadas em rosa e os tetraédros de PO<sub>4</sub> em azul. (Modificado de Huminicki & Hawthorne, 2002). (b) Representação esquemática da coordenação nove do poliédro ligado ao tetraédro de PO<sub>4</sub> (P em azul). (extraído de Williams et al., 2007, Modificado de Boatner, 2002). ....22
- Figura 3 - Diagrama de nomenclatura para o sistema 2REEPO<sub>4</sub> – CaTh(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> – 2ThSiO<sub>4</sub> com a nova divisão dos campos composicionais. (LINTHOUT, 2007). ....23
- Figura 4 - Quadro esquemático dos elementos-pais, abundância, meia-vida e elementos-filhos que constroem a série de decaimento U-Th-Pb. ....26
- Figura 5 - Séries de decaimento do <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th e <sup>235</sup>U. (Extraído e modificado sítio eletrônico NuDat (Nuclear Structure and Decay Data). ....28
- Figura 6 – Compartimentação geotectônica do Escudo Sul-rio-grandense. Em destaque os blocos reconhecidos para a região, as compartimentações do Bloco São Gabriel: Bloco Taquarembó e o Cinturão Vila Nova e, a Zona de Cisalhamento Ibaré (ZCI), ativa no Neoproterozóico. Em destaque o município de Lavras do Sul. Extraído e adaptado de Chemale Jr. (2000). ....31
- Figura 7 - Modelo evolutivo para o Escudo Sul Rio Grandense durante o Neoproterozóico (~900-540 Ma). Figura elaborada a partir das suas figuras 14 e 15 de Chemale Jr. (2000). Extraído de Mexias, (2000). ....32
- Figura 8 - Mapa geológico de Lavras do Sul com o posicionamento da área de estudo (Bloco Butiá). Extraído de Mexias (2000) adaptado a partir de Reichl (1980) e Nardi (1984). ....33
- Figura 9 - Mapa geológico de Lavras do Sul, representando as rochas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (Gastal & Lafon, 1998), com o posicionamento da área de estudo (Bloco Butiá). Extraído de Mexias (2000). ....35
- Figura 10 - Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul proposto e extraído de Mexias (2000). ....40

- Figura 11 – Antigas minas exploradas como pequenos empreendimentos minerários.  
 A - Antiga Mina do Bloco Butiá. Abandonada em 1938. B e C -  
 Representam a antiga cava da Boa Vista, abandonada em 1940.....41
- Figura 12 – Quadro com as principais idades para as rochas da região de Lavras do Sul.....45
- Figura 13 – Fotos do período de trabalho de campo. A-Caixas de testemunho selecionadas. B-Descrição das amostras selecionadas.....47
- Figura 14 – Esquema ilustrando o procedimento de coletas das amostras, desde a seleção da caixa de testemunho (A), o registro da amostra selecionada (B), a serragem (C) e, por fim, a identificação de cada material amostrado de acordo com o seu furo e intervalo de profundidade (D)...47
- Figura 15 - Foto do galpão de testemunhos da empresa Amarillo Gold Corporation, em Lavras do Sul, RS. ....48
- Figura 16 - Sequência de imagens mostrando parte do procedimento de preparação de amostra para análise isotópica em LA-MC-ICPMS. A – amostra fragmentada; B - britador de mandíbulas; C – peneiramento em malha de 5 mm; D – moinho de discos; E – peneiramento em malha de 0,5 mm; F – bateamento; G – separador magnético Frantz na vertical; H – concentração em placa de Petri; I – catação em lupa binocular; J – catação em microscópio de luz transmitida; K – grãos selecionados para análise; L – resinagem; M – *mount*. ....52
- Figura 17 - Procedimento de pulverização dos anfibólios. A - Amostra e a broca de perfuração. B - Pulverização do pseudomorfo de anfibólio. C - Amostras preparadas. ....54
- Figura 18 - Análise em MEV realizada na amostra 111,0. A) imagem de BSE com os pontos de EDS. B) perfil com os elementos identificados pelo EDS. ....56
- Figura 19 - MEV modelo JEOL JSM 5800 com EDS acoplado. Centro de Microscopia Eletrônica/UFRGS.....57
- Figura 20 - Laser Ablation do Laboratório de Geologia Isotópica do CPGq – IG/UFRGS.....59
- Figura 21 - MC-ICPMS do Laboratório de Geologia Isotópica do CPGq – IG/UFRGS. ....59
- Figura 22 - Desenho esquemático de um LA-MC-ICPMS do modelo Neptune da Finnigan, mostrando sua configuração básica, desde o laser que extrai

- material do grão de monazita, passando pela interface plasma que ioniza o material previamente extraído, pelo eletroímã que separa as massas, até os multicoletores. Extraído e modificado de Finnigan Neptune Hardware Manual. ....60
- Figura 23 – *Mount* de monazita padrão 44069.....62
- Figura 24 - Difratômetro SIEMENS D5000 do Laboratório de Difratometria de Raios X no Instituto de Geociências da UFRGS. ....63
- Figura 25 - Representação dos planos cristalinos e das ondas de raio x incidentes, segundo a Lei de Bragg (modificado de Cullity & Stock, 2001).....64
- Figura 26 - Aspecto macroscópico do Pertita Granito hidrotermalizado do Bloco Butiá afetado pela alteração propilítica (amostra BB 2-2). Trama granítica bem preservada. Pequenas pontuações negras são os grãos de pseudomorfos de anfibólios. Avermelhamento dos feldspatos e embranquiçamento do quartzo são feições características da propilitização. ....66
- Figura 27 – Fotomicrografias do pertita granito alterado propilicamente que preserva as feições magmáticas. A e E à luz natural e B, C, D e F à luz polarizada. A– feldspato alcalino com textura pertítica, B– albita intersticial, C e D – mostram a estrutura granítica preservada, com contato nítido entre os grãos. (amostras: A e B – BB 7-1; C - BB 7-1; D- BB7-4).....67
- Figura 28 – Fotomicrografias dos produtos de alteração do anfibólio. A e B – cloritização do anfibólio. C e D – titanita primária. E e F – cloritização do anfibólio restando quartzo, anatásio e clorita. G e H – calcita em rosa, tingida com alizarina, alterando o anfibólio. I e J – pseudomorfos de titanita com pequenos cristais de carbonato rico em terras raras. A, C, E, G e J à luz natural e B, D, F, H e I à luz polarizada. (amostras: A e B – BB7-1; C e D – BB7-3; E e F – BB7-1; G e H – BB7-4; I e J – BB7-5)...69
- Figura 29 – Fotomicrografias de monazitas hidrotermais. A,C, D, E e G à luz natural e B, D e F à luz polarizada. A, B, C e D - Aglomerados de monazita associada a anatásio em meio a venulação de mica branca. E e F – seta amarela indica o grão de monazita em meio a alteração do anfibólio. F - nos círculos em vermelho as pequenas manchas alaranjadas são grãos de monazitas em meio a zircões. ....70

- Figura 30 – Quadro mostrando as amostras analisadas em DRX e os principais minerais detectados. ....72
- Figura 31 - Grãos de monazita montados em *mount* (BB174,5). Grãos translúcidos com coloração alaranjada, por vezes intercrescidas com óxido. Possuem uma forma levemente oblata. ....74
- Figura 32 - Imagens BSE de monazitas em *mount*. Abaixo das imagens estão os espectros de EDS com os picos característicos para monazitas. A, C- Grãos com forma levemente oblata. D e F- Agregados de grãos de monazita. C e E-Os grãos geralmente aparecem afetados por fraturas, B e F-Grão completamente anédrico. H e I – Grãos de monazita (brancos) envoltos por outro mineral. ....76
- Figura 33 – Média das idades  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  (barras vermelhas) do padrão 44069 utilizado neste trabalho. Retângulo vermelho representa o erro analítico médio das análises e a linha inserida nele representa a idade média ponderada. O retângulo azul delimita a idade ID-TIMS do padrão segundo Aleinikoff et al. (2006). ....77
- Figura 34 - Média das idades  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  (barras vermelhas) das monazitas da amostra BB174,5. O retângulo laranja representa o erro analítico médio das análises e a linha inserida nele representa a idade média ponderada. ....79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSE – (backscattering) retroespalhamento de elétrons

CDF – Cinturão Dom Feliciano

CILS - Complexo Intrusivo Lavras do Sul

DRX – Difractometria de Raios-X

EDS – Energy Dispersive x-ray Spectrometer

LA-MC-ICPMS - (Excimer laser ablation – multi-collector – inductively coupled plasma mass spectrometry) espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado, multicoletor, com ablação a laser

ESRG – Escudo Sul-Rio-Grandense

ETR – Elementos Terras Raras

LN – Luz Natural

LP – Luz Polarizada

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

PG – Pertita Granito

SE – (Secondary Electron) elétrons secundários

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**LISTA DE SÍMBOLOS**

U – urânio

Pb – chumbo

P – fósforo

Th – tório

Ce – cério

La – lantânio

$\mu\text{m}$  – micra

P – fósforo

Nd – neodímio

Ca – cálcio

Si – silício

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 Problema .....	18
1.2 Premissas .....	18
1.3 Hipóteses.....	19
1.4 Objetivos Gerais e Específicos .....	19
1.5 Localização da Área de Estudo .....	19
2. ESTADO DA ARTE .....	21
2.1 A Monazita.....	21
2.2 O Método U-Th-Pb .....	25
2.3 Contexto Geológico/Geotectônico .....	29
2.4 Geologia da Região de Lavras do Sul .....	32
2.5 Dados Geocronológicos.....	42
3. METODOLOGIA .....	46
3.1 Trabalho de Campo .....	46
3.2 Separação das Monazitas Para Datação Radiométrica.....	48
3.3 Lâminas Delgadas .....	52
3.4 Preparação das Amostras para Difratomia de Raios-X .....	54
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	54
3.6 Análise U-Th-Pb em Monazita .....	57
3.7 Padrão Internacional 44069:.....	60
3.8 Difratomia de Raios - X (DRX):.....	62
4. RESULTADOS.....	65
4.1 Petrografia .....	65
4.1.1 Difratomia de Raios X .....	71
4.2 Características da Monazita .....	73
4.3 Dados Isotópicos .....	76
4.3.1 Resultado do padrão .....	76
4.3.2 Resultados das Amostras .....	77
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83



## 1. INTRODUÇÃO

---

A monazita é um fosfato rico em elementos terras raras (Ce, La, Pr, Nd, Y)PO<sub>4</sub>. Por ser capaz de incorporar, através de substituições iônicas, significativas quantias de U e Th durante sua formação, armazenar o Pb radiogênico em sua estrutura e ter temperatura de fechamento ca. 700°C (Parrish, 1990), a monazita tem sido amplamente usada como geocronômetro de diversos eventos geológicos, inclusive os hidrotermais (Kempe et al., 2008; Poitrasson et al., 2000;).

A fim de verificar o potencial do uso da monazita como um novo método para a datação via LA-MC-ICPMS no Laboratório de Geologia Isotópica da UFRGS e contribuir com novos dados geocronológicos para hidrotermalismo, este trabalho relata o comportamento isotópico da monazita hidrotermal, gerada a partir da alteração do anfibólio do pertita granito - zona periférica do CILS - sob a influência de fluidos hidrotermais responsáveis pelas ocorrências de ouro e cobre na região. Em conjunto com estas análises foi utilizado o padrão internacional 44069 (aleinikoff et al., 2006) para a redução dos dados.

As informações obtidas até hoje sobre a idade do evento hidrotermal no Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e nas suas encaixantes referem-se a um evento contemporâneo à intrusão do CILS. Dentre os dados existentes sobre as rochas hidrotermais estão a idade de 582±6 Ma pelo método Rb-Sr em micas brancas e anfibólio, associados à alteração fílica (Bongiolo, 2002), e a idade U-Pb SHRIMP de 580±5 Ma em zircões hidrotermalizados (Mexias, 2000).

## 1.1 Problema

Apesar de diversos estudos em produtos da alteração hidrotermal que afetou tanto as rochas do CILS como as suas encaixantes, ainda restam dúvidas a respeito da relação temporal entre a intrusão granítica e o hidrotermalismo. Dos dados mais recentes para as rochas hidrotermais encontram-se U-PB SHRIMP em zircões hidrotermalizados do pertita granito com  $580 \pm 5$  Ma, Rb-Sr em micas brancas fengíticas  $573 \pm 5$  a  $588 \pm 5$  ( $R_i = 0,705-0,715$ )  $583 \pm 10$  Ma ( $R_i = 0,705$ ) (Mexias, 2000) e Rb-Sr em grãos de mica branca (fengita e ilita) e anfibólio (Fe-actinolita) associados a alteração fílica com  $582 \pm 6$  Ma (Bongiolo, 2002). Estes resultados indicam uma contemporaneidade entre o CILS e a ação hidrotermal.

A idade para este evento pode ser melhor embasada com aplicação de métodos analíticos de precisão, como LA-MC-ICPMS, em minerais hidrotermais, como a monazita encontrada em rochas propilitizadas do pertita granito, zona periférica do CILS.

## 1.2 Premissas

As premissas que embasam este trabalho levam em consideração os contrastes mineralógicos entre o protólito e o pertita granito hidrotermalizado. A mineralogia do protólito é composta essencialmente por feldspato alcalino perfitico, quartzo e anfibólio do tipo Fe-edenita (Nardi, 1984); albita intersticial, apresentando como secundários titanita, apatita, ilmenita e magnetita. Quando afetado pelos fluidos do processo hidrotermal o anfibólio se desestabiliza, fazendo com que o sistema gere fases minerais estáveis nas novas condições. Estas novas fases são: clorita, calcita, quartzo, anatásio e a monazita, o mineral de interesse para este estudo. A monazita incorpora o fósforo das apatitas e os ETR do anfibólio. (Mexias, 2000). Sendo ela um fosfato de ETR, as substituições iônicas que ocorrem na sua estrutura permitem a incorporação de U e Th; todo o Pb presente nessa, é produto de decaimento destes elementos-pais. Desta forma, a monazita encontrada no PG hidrotermalizado torna-se um atraente geocronômetro para o evento em questão.

### 1.3 Hipóteses

Considera-se como hipótese neste trabalho que a monazita encontrada no pertita granito hidrotermalizado é formada unicamente a partir da ação dos fluidos hidrotermais sobre o anfibólio. Datando-a, poderemos fornecer um novo dado de datação direta da alteração hidrotermal além de contribuir com o desenvolvimento da metodologia de datação de monazita por LA-MC-ICPMS no LGI.

### 1.4 Objetivos Gerais e Específicos

De forma geral a metodologia de trabalho empregada buscou aprimorar os conhecimentos acerca da técnica U-Th-Pb *in situ* via LA-MC-ICPMS em monazitas. Além de contribuir e expandir o número de datações sobre o evento hidrotermal no CILS.

Em caráter mais específico os objetivos delimitados foram, além da aplicação da técnica, descrever as transformações mineralógicas associadas ao processo de alteração que gera a monazita, estudar o comportamento isotópico U-Th-Pb da mesma em condições hidrotermais e o desenvolvimento e aprimoramento da metodologia de datação de monazita *in situ*, técnica ainda não padronizada, no LGI/UFRGS.

### 1.5 Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Lavras do Sul, região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Tem seu entorno limitado a norte pelo município de São Sepé, a leste com Caçapava do Sul e a oeste com São Gabriel. Distante cerca de 324 km de Porto Alegre, liga-se à capital através da BR-290, no sentido oeste, até o entroncamento com a BR-392. Seguindo ao sul, chega-se ao município de Caçapava do Sul; a partir daí, pela RS-357, sentido sudoeste, percorre-se 57 km até o município de Lavras do Sul. A área em questão, conhecida como Bloco Butiá, localizada a 4-5 Km a oeste da cidade. A localização pode ser vista na figura 1.

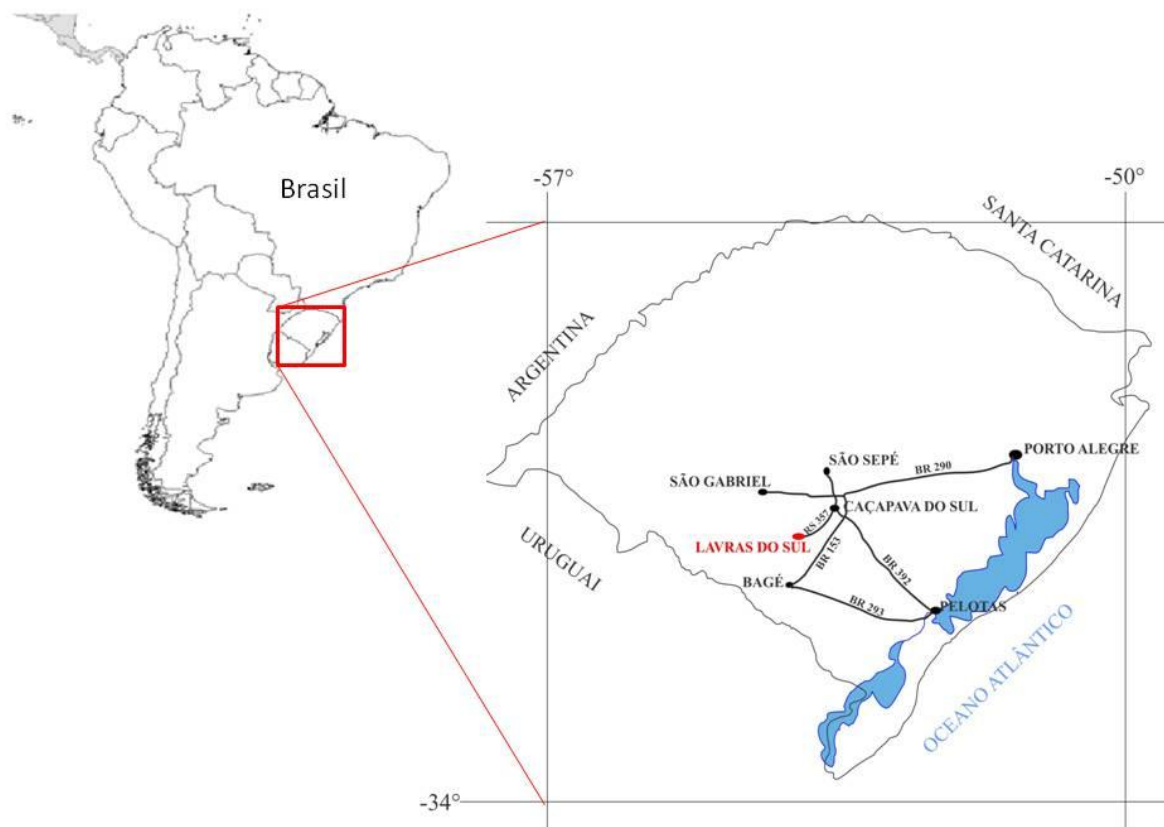


Figura 1 – Mapa rodoviário simplificado do estado do Rio Grande do Sul (adaptado de DNIT, 2002) e localização na América do Sul.

## 2. ESTADO DA ARTE

---

Neste trabalho, o estado da arte foi dividido em dois enfoques. O primeiro abrange temas importantes para o desenvolvimento metodológico de datação de monazita, como uma breve revisão sobre este mineral e, em seguida, o método de datação U-Th-Pb. O segundo enfoque trata a respeito do contexto geológico onde estão inseridas as amostras analisadas.

### 2.1 A Monazita

A monazita, um ortofosfato monoclinico de Terras Raras Leves, tem seu arranjo estrutural do tipo  $A(PO_4)$  baseado em um poliedro de coordenação 9, ocupando o sitio A, ligado a um tetraedro de fósforo. Os poliedros compartilham entre si os vértices formando, cadeias ao longo da direção **b**. Na direção do eixo cristalográfico **c** as cadeias são formadas pelo compartilhamento dos vértices dos poliedros, intercalados por tetraedros empilhadas na direção **a** (Figura 2).

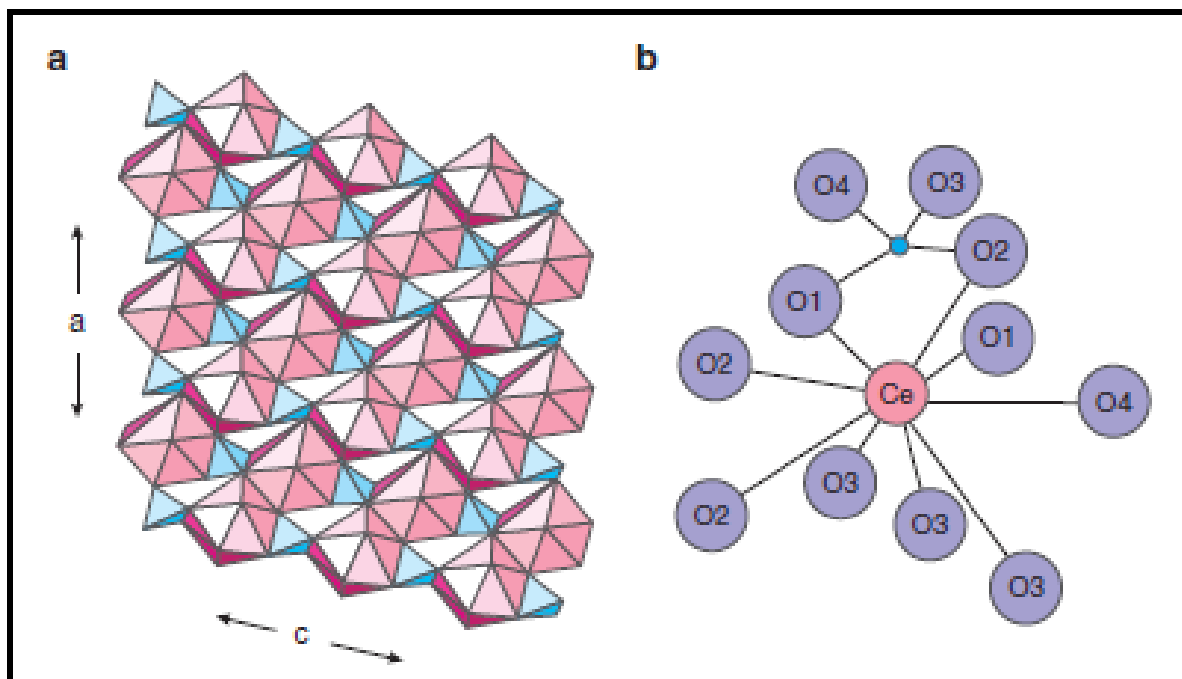
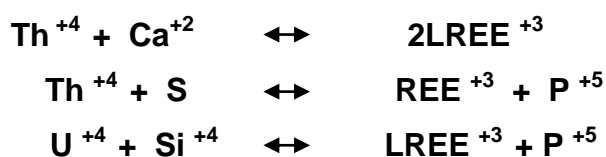


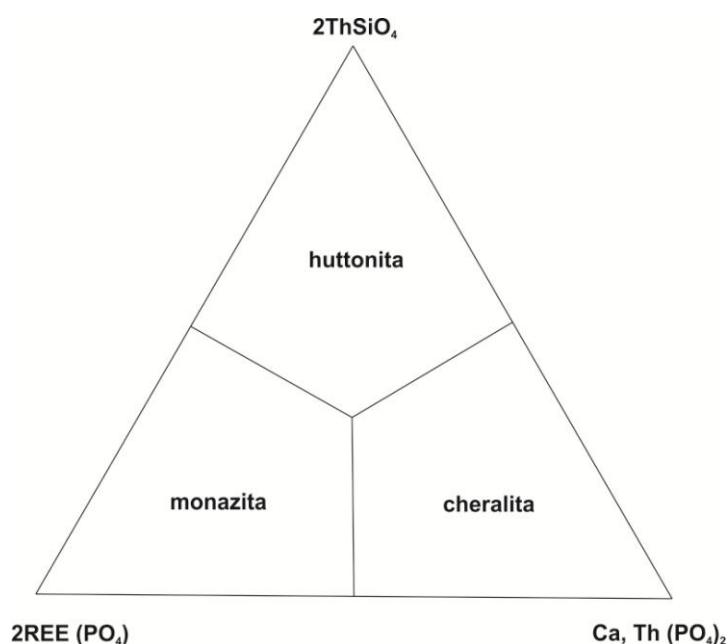
Figura 2 - (a) Estrutura cristalina da monazita. Os poliedros de ETR são sombreadas em rosa e os tetraédros de PO4 em azul. (Modificado de Huminicki & Hawthorne, 2002). (b) Representação esquemática da coordenação nove do políedro ligado ao tetraédro de PO4 (P em azul). (extraído de Williams et al., 2007, Modificado de Boatner, 2002).

A distribuição de ETR na monazita se torna um reflexo da coordenação e do tamanho do poliedro. No sitio de coordenação nove oito ligações com o O<sub>2</sub> são equivalentes, ou seja, possuem o mesmo comprimento. A nona ligação, a apical, é mais curta, resultando num poliedro irregular e uma célula unitária com simetria monoclinica, favorável à acomodação de ETR grandes e leves. Também é possível a acomodação de significantes quantidades de ETR pequenos e pesados na estrutura da monazita, porém para que o sistema permaneça monoclinico a ocupação dos sitio-A devem ser > 50 mol% por ETR Leves.

Variações composicionais que ocorrem na estrutura cristalina da monazita estão associadas às substituições iônicas, controladas pelo raio e pela carga do íon. As principais são descritas abaixo:



A  $[Ca, Th, (PO_4)_2]$ , substituição mais comum, é um membro final de um sistema ternário que inclui monazita  $[2REE (PO_4)]$  e huttonita  $[2ThSiO_4]$ . A recente decisão do IMA-CNMNC simplificou a nomenclatura do sistema e determinou que substâncias dominadas pelo membro  $[Ca, Th (PO_4)_2]$  = Brabantita, devem ser referidas como Cheralita; membro final de uma solução sólida isoestrutural com monazita. A forma de nomenclatura das monazitas pode ser visualizada na Figura 3. A incorporação de U e Th na sua estrutura é possível através das substituições huttonítica e brabantítica. O Urânio e Tório fazem parte da série dos actinídeos, por causa dessa configuração similar, Th (Z=90) e U (Z=92), apresentam propriedades químicas muito próximas. Ambos ocorrem na natureza na forma oxidante tetravalente e com raios iônicos similares ( $U^{+4} = 1.05 \text{ \AA}$ ,  $Th^{+4} = 1.10 \text{ \AA}$ ). Também é possível a incorporação de outros cátions divalentes à estrutura além do Ca, como Cd, Sr, Pb, e Ba.



**Figura 3 - Diagrama de nomenclatura para o sistema  $2REEPO_4 - CaTh(PO_4)_2 - 2ThSiO_4$  com a nova divisão dos campos composicionais. (LINTHOUT, 2007).**

A Monazita é um geocronômetro para muitos processos geológicos devido à amplitude de rochas hospedeiras e a alta temperatura de fechamento para U-Pb, em torno de  $700^\circ\text{C}$ , maior do que a temperatura de muitos eventos geológicos. Em

muitas rochas este mineral é o hospedeiro mais comum de U e Th. A relação destes com o Pb radiogênico pode, através do decaimento radioativo  $\alpha$  e  $\beta$  e sob certas circunstâncias, indicar o tempo de cristalização e/ou de crescimento do mineral. (Ni et al., 1995). Para a datação de eventos hidrotermais é um dos mais confiáveis geocronômetros, embora problemas como grãos muito pequenos, sobrecrescimentos e até mesmo a distinção entre monazita hidrotermal e ígnea, possam dificultar um pouco a sua identificação. Para se ter uma interpretação adequada das idades é necessária uma compreensão criteriosa do comportamento desta fase, sua composição química e o sistema isotópico envolvido. Os grãos de monazita hidrotermal geralmente ocorrem como pequenos cristais acessórios, com uma certa abundância (*clustering*) dentro de uma pequena área e comumente associados a minerais hidrotermais. Já os grãos de monazita ígnea ocorrem mais esparsamente distribuídos. Outro critério distintivo, e mais importante, é o baixo teor  $\text{ThO}_2$  da monazita hidrotermal (geralmente <1% em peso) em relação ao monazita ígnea (3 -> 5% em peso). Monazita ígnea é intersticial ou incluída em minerais primários, principalmente em quartzo, feldspato e biotita ígnea; já a monazita hidrotermal ocorre comumente como inclusões em silicatos, em albita secundária, e em quartzo secundário ou anfibólio. Halos escuros pleocróicos de intensidade variável em torno de grãos monazíticos são característicos e são atribuídos aos danos da radiação causada pelo decaimento de U e Th no mineral hospedeiro. (Schandl & Gorton, 2004).

Apesar de parecer ser opticamente homogênea, distintos aspectos texturais, que equivalem a diferentes domínios composicionais, podem ser identificados. Por meio de imageamentos eletrônicos estas zonações composicionais indicam sucessivas gerações de crescimentos, normalmente de diferentes idades, de um novo grão, onde a composição química e a textura de cada geração pode refletir as condições geológicas e processos geológicos ativos no tempo registrados na história da rocha hospedeira. Além de fornecer relações composicionais com as fases nas quais está incluída, indicando possíveis reações.



## 2.2 O Método U-Th-Pb

A datação radiométrica U-Th-Pb é baseada na premissa de que todo o Pb presente em um mineral que possua significativas quantidades de Th e/ou U, tem origem radiogênica e aumenta em função do tempo. Para entender este, e qualquer outro sistema de datação, é necessário ter em mente que a alta concentração de partículas positivas (prótons) no núcleo de um átomo gera uma grande instabilidade, visto que partículas com cargas iguais repelem-se. A tendência é de que prótons tentem tomar o maior espaço possível, já que a força que une estas partículas não é capaz de manter o atrito, levando o núcleo ao rompimento e liberando, espontaneamente, o excesso de energia, por meio da emissão de radiações alfa e beta, as vezes acompanhadas de emissão gama. Assim, um novo núcleo, com maior grau de estabilidade, é gerado. O tempo necessário para que um átomo instável (isótopo-pai) decaia e gere um átomo mais estável (isótopo-filho) é chamado de meia-vida ( $T_{1/2}$ ), e representa o intervalo de tempo para que a sua atividade seja diminuída pela metade. A atividade de um átomo decai a uma taxa constante ( $\lambda$ ), única para cada átomo, sem sofrer nenhum tipo de interferência externa ao núcleo.

No sistema U-Th-Pb (Figura 5), o Urânio e o Tório fazem parte da série dos actínídeos, possuindo uma configuração similar, Th ( $Z=90$ ) e U ( $Z=92$ ), e acabam por apresentar propriedades químicas muito próximas. Ambos ocorrem na natureza na forma tetravalente oxidante e com raios iônicos muito similares ( $U^{+4} = 1.05 \text{ \AA}$ ,  $Th^{+4} = 1.10 \text{ \AA}$ ). O Urânio ocorre naturalmente sobre a forma de três isótopos radioativos:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$ , e o Tório, ocorre apenas como um único isótopo radioativo:  $^{232}\text{Th}$ . As três séries naturais de decaimento que compõem este sistema de datação ocorrem em função da emissão de partículas  $\alpha$  e  $\beta$ , e podem ser resumidas da pela seguinte forma:

Isótopo Radioativo	Abundância (%)	T <sub>1/2</sub> (anos)	λ (a <sup>-1</sup> )	Radiação	Isótopo Radiogênico
<sup>238</sup> U	99.27	4.47x10 <sup>9</sup>	1.55x10 <sup>-10</sup>	8α+6β <sup>-</sup> +Q	<sup>206</sup> Pb
<sup>235</sup> U	0.72	0.704x10 <sup>9</sup>	9.85x10 <sup>-10</sup>	7α+4β <sup>-</sup> +Q	<sup>207</sup> Pb
<sup>232</sup> Th	100.0	14.01x10 <sup>9</sup>	4.95x10 <sup>-11</sup>	6α+4β <sup>-</sup> +Q	<sup>208</sup> Pb
<sup>234</sup> U	0.0057	2.47x10 <sup>5</sup>	2.806x10 <sup>-6</sup>	-	-

Figura 4 - Quadro esquemático dos elementos-pais, abundância, meia-vida e elementos-filhos que constroem a série de decaimento U-Th-Pb.

O chumbo possui naturalmente quatro isótopos: <sup>208</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb e <sup>204</sup>Pb. Os três primeiros são produto do decaimento do U e Th, apenas o <sup>204</sup>Pb não é radiogênico; considera-se que ele tenha uma abundância constante, por isso é utilizado como referência. A evolução isotópica do Pb nos minerais é expressa pela seguinte equação:

$$y = a + x.m \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_1 t} - 1) \\ \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_2 t} - 1) \\ \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{{}^{232}\text{Th}}{{}^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_3 t} - 1) \end{array} \right.$$

Onde:

-  $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}, \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}, \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}$  é a razão isotópica do chumbo no mineral no momento da análise;

-  $\left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0, \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0, \left( \frac{{}^{208}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0$  é a razão isotópica inicial de chumbo incorporada no momento da sua formação;

- $\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}, \frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}}$  é a razão isotópica no momento da análise,
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  é a constante de decaimento.
- $t$  é o tempo decorrido desde o fechamento do mineral para U-Th-Pb e seus filhos intermediários.

Calculando em relação ao tempo:

$$t_{206} = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0}{\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}} + 1 \right),$$

o cálculo para os outros elementos envolvidos é desenvolvido da mesma forma.

Em cada série de decaimento há elementos-filhos intermediários, com meias-vidas muito mais curtas do que as dos elementos-pais, que não se repetem em outras séries. Como cada elemento-filho intermediário faz parte de apenas uma única série de decaimento, eles dão informações apenas sobre um isótopo específico satisfazendo a premissa para o estabelecimento do equilíbrio secular. Se este equilíbrio for atingido e o mineral mantiver-se como um sistema fechado, pode-se considerar que a taxa de produção de um elemento-filho é igual à taxa de decaimento do elemento-pai. Dessa forma, o decaimento pode ser tratado como se ocorresse de forma direta, do pai para o filho.

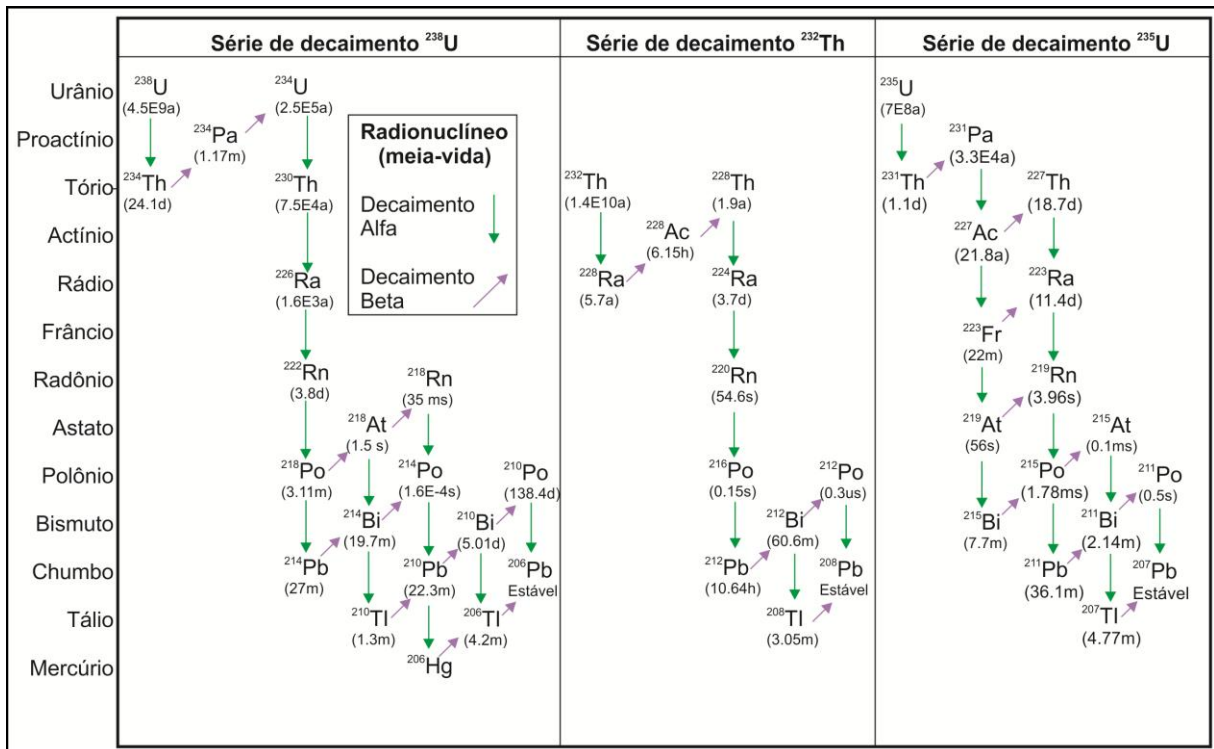


Figura 5 - Séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{235}\text{U}$ . (Extraído e modificado sítio eletrônico NuDat (Nuclear Structure and Decay Data).

Conhecendo a constante de decaimento do elemento-pai e medindo as abundâncias dos isótopos radioativos (U e Th) e dos isótopos radiogênicos (Pb), cada série pode ser usada como um sistema de datação independente e, teoricamente, devem resultar na mesma idade e se concordantes se:

- 1) o mineral tiver permanecido fechado para U, Pb e todos os elementos-filhos intermediários durante a sua história;
- 2) valores corretos de Pb iniciais forem utilizados para as correções do Pb obtido analiticamente;
- 3) as constantes de decaimento forem perfeitamente conhecidas;
- 4) a composição do U é normal e não foi modificada por fracionamento isotópico ou pela ocorrência de uma série natural de reações baseada na fissão do  $^{235}\text{U}$  (Faure, 1986).

Com os dados analíticos adquiridos, é então feito o diagrama concórdia, desenvolvido por Wetherill em 1956 utilizando materiais condríticos como base (Parrish et al., 2003). Este diagrama representa o lugar geométrico dos pontos de

idades concordantes obtidas pelos geocronômetros  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  e  $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$  que resultam uma mesma idade. Nesse diagrama os locais geométricos de mesma idade para os dois sistemas de decaimento foram expandidos desde a idade zero da Terra (4,6 Ga).

Quando o mineral ou rocha datado permanece fechado para o urânio e todos os seus isótopos radiogênicos, as idades obtidas pelos sistemas  $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$  e  $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$  são iguais e no diagrama  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  os pontos analíticos coincidem com a concórdia. Caso o sistema não tenha se mantido fechado, perdas de Pb e/ou ganho de U e/ou Th mudam as coordenadas dos pontos no diagrama para algum lugar fora da concórdia. O intemperismo químico, a difusão e o metamorfismo são eventos que podem causar a perda de Pb. Se todo o Pb for perdido o sistema U-Pb será homogeneizado e o registro dos eventos anteriores será perdido. Contudo, no caso de perdas parciais, este problema pode ser minimizado pelo cálculo de uma idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  pois a razão  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  é insensível à perda de Pb.

$$\frac{\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_0}{\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_0} = \frac{^{235}\text{U} \left( \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1} \right)}{^{238}\text{U} \left( \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1} \right)}$$

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}\right)^* = \frac{1}{137.88} \left( \frac{e^{\lambda_2 t} - 1}{e^{\lambda_1 t} - 1} \right)$$

Essa possibilidade de ajuste somente é possível nesse método, decorrendo daí o porque da sua preferência em relação aos outros métodos de datação (Geraldes, 2010).

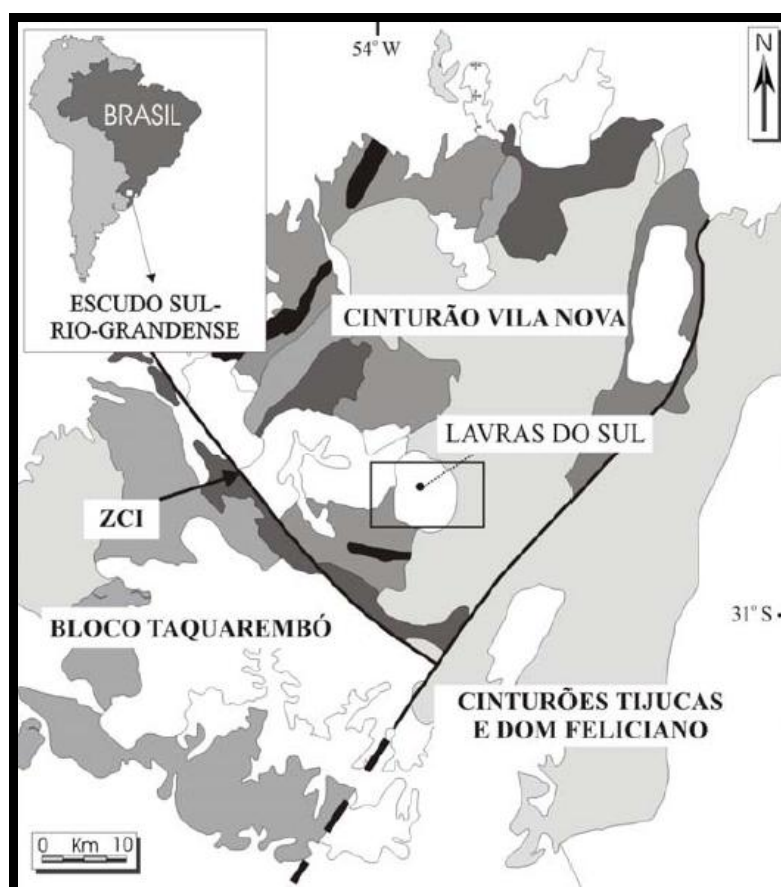
### 2.3 Contexto Geológico/Geotectônico

A região de Lavras do Sul está localizada na porção central do Escudo Sul Rio Grandense (ESRG), inserido no setor meridional da Província da Mantiqueira

(Almeida & Hasui, 1984). A Província da Mantiqueira representa uma faixa móvel de direção NNE-SSW paralela à costa atlântica desde o sul da Bahia até o sul do Brasil. Foi originada durante a orogenia Brasileira, a qual resultou na amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental. No sul do Brasil ela surge como uma resposta à colisão entre os crátons Kalahary e Rio De La Plata.

O Escudo Sul Rio Grandense (ESRG), segundo a compartimentação de Chemale Jr. (2000), tem com principais unidades geotectônicas o Bloco Taquarembó (BT), o Cinturão Vila Nova (CVN), o Cinturão Tijucas (CT) e o Cinturão Dom Feliciano (CDF) (Chemale Jr., 2000)(Figura 6). O BT e o CVN foram denominados anteriormente de Bloco São Gabriel por Jost & Hartmann (1984).

No Cinturão Vila Nova foram reconhecidas duas unidades petrotectônicas: o Terreno Metamórfico de Acreção Palma (TMAP) (idades  $T_{DM}$  entre 1000 a 700 Ma) e a Associação Plutono Vulcano-Sedimentar Seival (APVSS) (610 a 640 Ma). É limitado a sul pelo Lineamento Ibaré em contato com o Bloco Taquerembó, a leste pela Sutura de Caçapava do Sul, com direção NE-SW, e a norte e a oeste pela cobertura sedimentar da Bacia do Paraná. Este cinturão é caracterizado por acreção de arcos magmáticos juvenis à borda do Cráton Rio De La Plata, nos estágios iniciais do ciclo Brasileiro, com processos vulcânicos e sedimentares associados. Cabe salientar que a sequência de rochas graníticas que ocorrem na região deste trabalho está incluída na Associação Plutono Vulcano-Sedimentar-Seival (APVSS).



**Figura 6 – Compartimentação geotectônica do Escudo Sul-rio-grandense. Em destaque os blocos reconhecidos para a região, as compartimentações do Bloco São Gabriel: Bloco Taquarembó e o Cinturão Vila Nova e, a Zona de Cisalhamento Ibaré (ZCI), ativa no Neoproterozóico. Em destaque o município de Lavras do Sul. Extraído e adaptado de Chemale Jr. (2000).**

A APVSS consiste de rochas vulcânicas básicas à intermediárias, sedimentares siliciclásticas pertencentes à Bacia do Camaquã, com intrusões graníticas geradas nos estágios tardi a pós-orogênicos em relação ao Evento Dom Feliciano/Brasiliano (650 – 500 Ma), em situação de retroarco, relacionada à subducção da Placa Kalahari sob a Placa Rio de La Plata (Chemale Jr, 2000) (Figura 7).

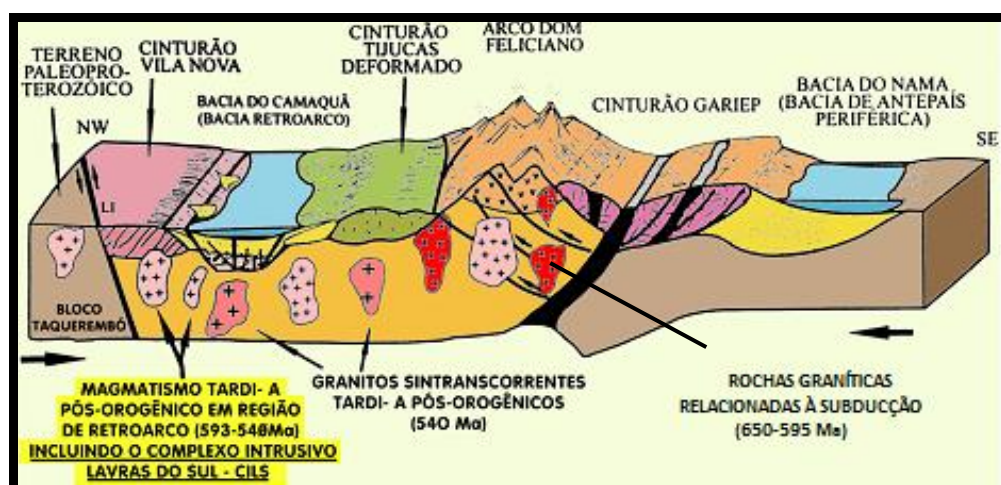
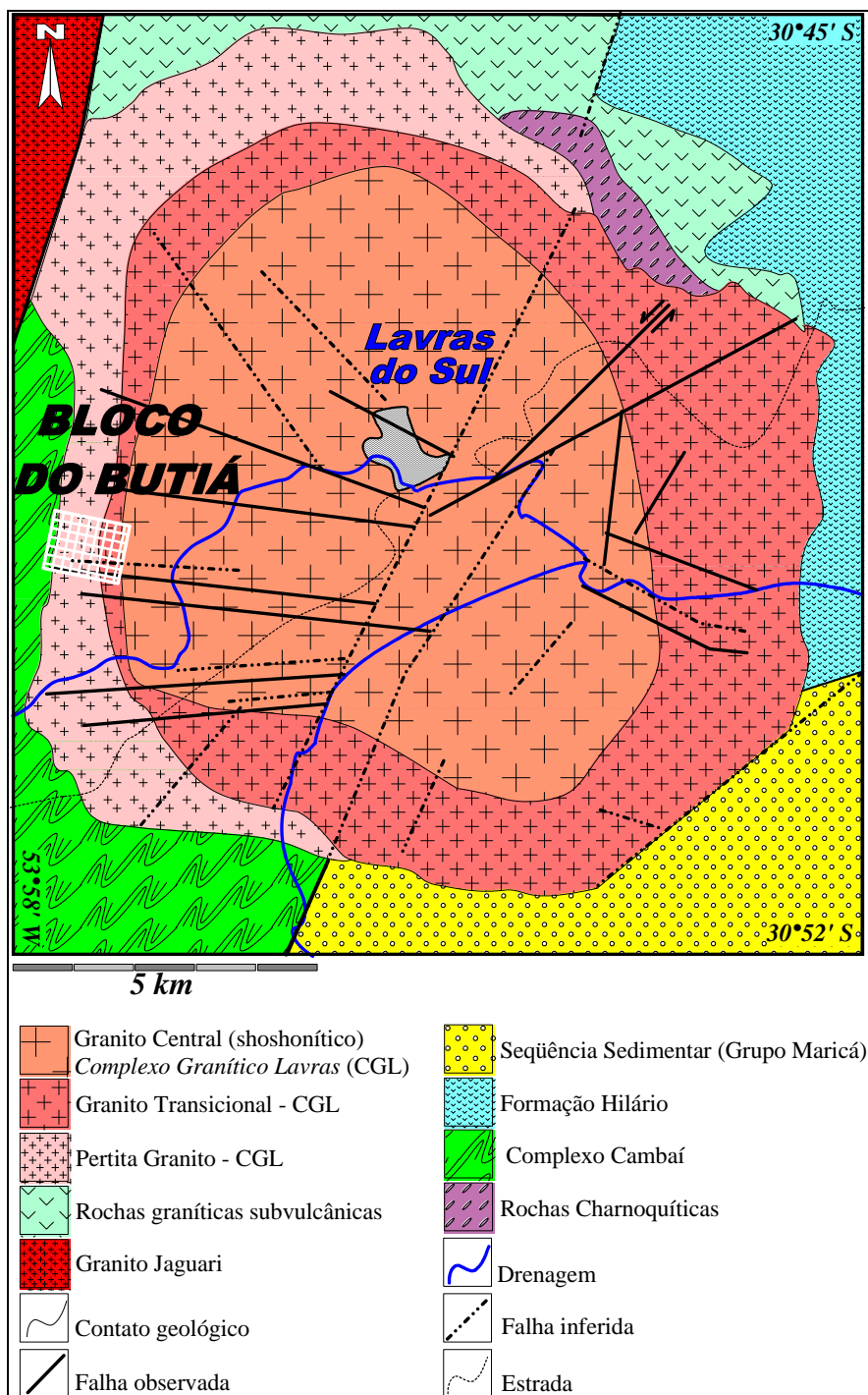


Figura 7 - Modelo evolutivo para o Escudo Sul Rio Grandense durante o Neoproterozóico (~900-540 Ma). Figura elaborada a partir das suas figuras 14 e 15 de Chemale Jr. (2000). Extraído de Mexias, (2000).

## 2.4 Geologia da Região de Lavras do Sul

A região de estudo é constituída por uma associação de rochas graníticas, denominadas por Nardi (1984) de Complexo Granítico Lavras (CGL), que compreende um complexo com um núcleo granodiorítico de afinidade shoshonítica ( fácies central) e uma borda ( fácies periférica) distribuída mais ao sul, oeste e norte do plúton, formada por sienos e pertita-granitos de afinidade alcalina (Figura 8). Segundo este autor, o magma de afinidade geoquímica alcalina teria assimilado parcialmente o magma granodiorítico, de afinidade geoquímica shoshonítica, formando rochas híbridas com características transicionais entre estes dois tipos. O autor ainda sugere que os granodioritos e monzogranitos do núcleo e os pertita-granitos periféricos teriam origens independentes, sendo a associação dessas litologias atribuída ao seu posicionamento ao longo de zonas de fraqueza.

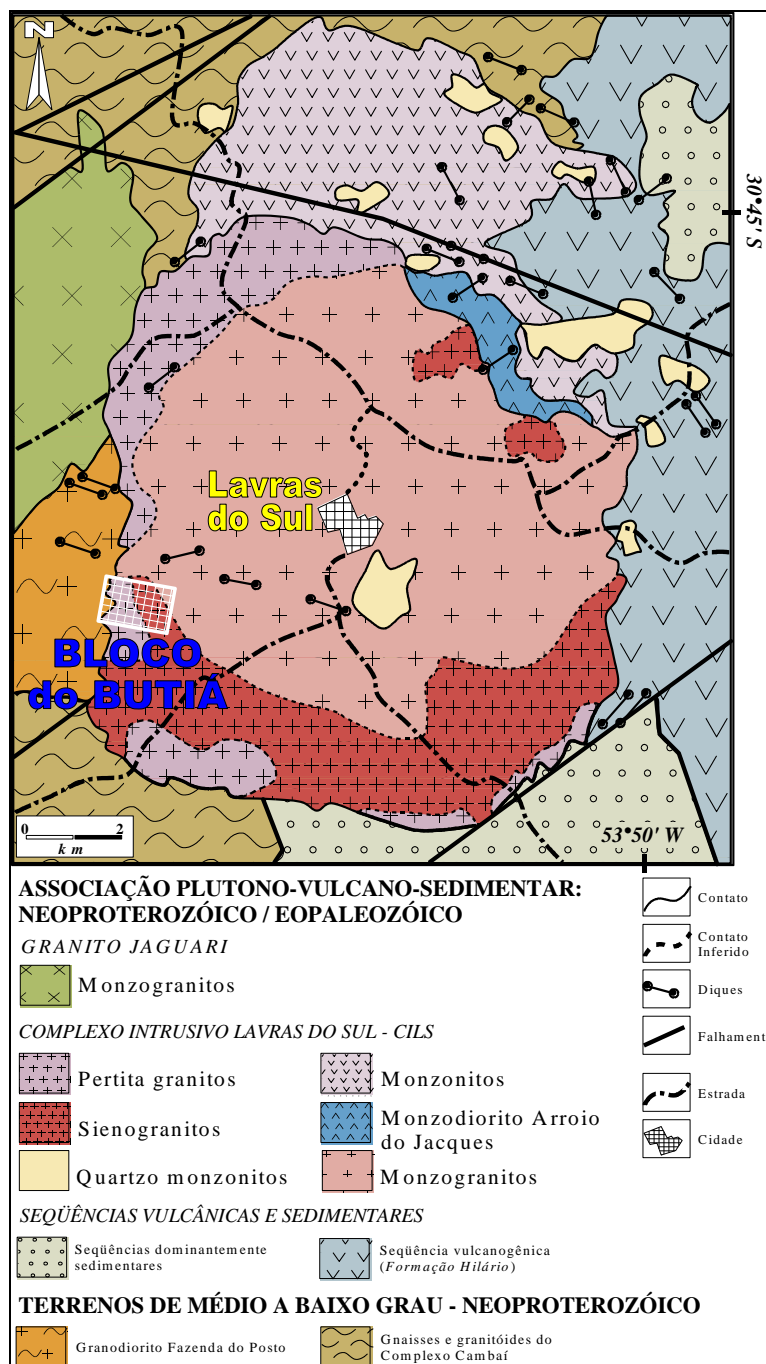




**Figura 8 - Mapa geológico de Lavras do Sul com o posicionamento da área de estudo (Bloco Butiá). Extraído de Mexias (2000) adaptado a partir de Reichl (1980) e Nardi (1984).**

Gastal & Lafon (1998) redefiniram o CGL e propuseram o termo Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), incluindo neste monzodioritos, monzonitos porfiríticos

e quartzo monzonitos que ocorrem ao norte (Figura 9). Os autores também reinterpretaram as fácies descritas por Nardi (1984) e definiram duas fácies graníticas: (i) alcalinas, constituídas por pertita-granitos e sienogranitos a quartzosienitos e (ii) shoshoníticas, representadas por monzo e granodioritos, quartzomonzonitos e monzogranitos porfiríticos. Os autores admitem, com base nas relações de campo e dados texturais, a contemporaneidade entre os eventos shoshonítico e alcalino ressaltando resultados geocronológicos U-Pb, que indicam um intervalo de ca. 12 Ma entre os dois tipos de rochas; considerando os erros, há superposição entre os dois tipos. Entretanto, admitem que as fácies alcalinas são relativamente mais tardias.



**Figura 9 - Mapa geológico de Lavras do Sul, representando as rochas do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (Gastal & Lafon, 1998), com o posicionamento da área de estudo (Bloco Butiá). Extraído de Mexias (2000).**

A afinidade geoquímica alcalina dos pertita granitos que compõem a porção periférica do CILS condicionou a associação desta intrusão, por Nardi & Bonin (1991), a outras de mesmo quimismo na Suíte Intrusiva Saibro (SIS). Já as rochas

de afinidade shoshonítica fazem parte da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul (ASLS), reconhecida por Nardi & Lima (1985), que compreendem as rochas da zona central de Nardi (1984) e as rochas efusivas pertencentes à Formação Hilário. Associados geneticamente ao magmatismo shoshonítico, ocorrem diques ácidos e intermediários, além de necks monzoníticos a quartzo-monzoníticos e localizadamente são observados lamprófiros espessartíticos e leucodioritos cumuláticos.

Gastal & Lafon (1998) defenderam que a transição entre os dois eventos magmáticos (shoshonítico e metaluminoso fortemente alcalino, núcleo e borda, respectivamente, do CILS) poderia estar relacionada a heterogeneidades em pequena escala nas fontes mantélicas ou na interação manto-crosta cujas diferenças iniciais dos magmas parentais teriam sido posteriormente ampliadas durante a diferenciação magmática. Evidências de coexistência de magmatismo básico e ácido são suportadas pela presença de enclaves máficos microgranulares no complexo granítico (Nardi & Lima, 2000).

O CILS apresenta uma forma alongada segundo a direção N-S, com dimensões de 12 x 18 km. A sul é circundado pela sequência sedimentar da Formação Maricá cujas principais estruturas sedimentares são representadas pela estratificação rítmica de arenitos arcoseanos, siltitos e grauvacas. Estas rochas teriam sido formadas em um ambiente influenciado por deposição sobre as margens de uma bacia com alta declividade, dando origem às correntes de turbidez. A intrusão granítica nestas sequências gerou um metamorfismo de contato, observado nos primeiros 50 m (Ribeiro, 1983). A oeste, o CILS está em contato com o Granito Jaguari, mais jovem, e com as rochas gnáissicas e metagranitóides do Grupo Cambaí. A leste está em contato com a sequência vulcânica da Formação Hilário (FH) (Ribeiro & Fantinel, 1978). Paim *et al.*(1995), através de conceitos de estratigrafia de sequências, denominaram de Alosupergrupo Camaquã as rochas presentes na Bacia do Camaquã (BC) - bacia de retroarco formada nos estágios finais da orogenia Brasileira/Pan-Africana. O Alosupergrupo foi subdividido em quatro grandes unidades separadas entre si por discordâncias angulares (Alogrupos Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas). O Alogrupo Bom Jardim contém a

sequência vulcano-sedimentar da APVSS (Chemale Jr., 2000). A porção basal deste alogrupo é representada pelas rochas vulcanogênicas da Formação Hilário (FH), encaixantes a leste dos granitóides. Dentre as vulcanogênicas são identificados tufos líticos, à cristal e a pó, lúpili-tufos, aglomerados e brechas piroclásticas intercalados com lavas de traquibasaltos e traquiandesitos e localizadamente, depósitos epiclásticos e ignimbritos (Nardi & Lima, 2000). A intrusão da porção leste do CILS nas rochas vulcanogênicas da FH gerou uma auréola de metamorfismo de contato de grau médio, com aproximadamente 50 m de espessura chegando até a fácies hornblenda hornfels inferior e uma zona com albita epidoto que se estende de 50-450 m (Mexias, 1990). Nestes locais de contato predominam níveis de lavas de composição andesítica sobre os termos piroclásticos.

O Distrito Aurífero de Lavras do Sul (DALIS) hospeda depósitos de ouro e, secundariamente de cobre, produtos de um evento hidrotermal associado a um sistema semelhante ao tipo Cu-pórfiro. Esta mineralização ocorre tanto nas rochas do CILS como na sequência vulcano-sedimentar da Formação Hilário. Através do detalhado estudo estrutural e tectônico feito por Kaul & Zir F°. (1974), foram identificados esforços compressivos de direção EW sobre os granitos e as rochas vulcânicas, gerando falhas de tensão através das quais fluidos mineralizantes percolaram e onde, preferencialmente, estariam encaixadas as estruturas e filões mineralizados. Bongioiolo (2002) fez uma caracterização completa do DALIS; nas porções mais distais dos veios ocorre a alteração propílica nos granodioritos, monzogranitos e sienogranitos e é representada pela transformação do anfibólio e biotita em clorita e epidoto, enquanto que no pertita-granito ocorre a transformação do anfibólio em clorita. Próxima a estes veios observa-se a alteração fílica com quartzo, mica branca e pirita e nas rochas vulcanogênicas, de forma mais expressiva, há a formação de clorita e epidoto. De acordo com o autor as mineralizações do DALIS são predominantemente filonianas, concentradas em uma estreita faixa NW-SE com direções N40W a E-W e, localizadamente, NE. As mineralizações disseminadas ocorrem de forma restrita no pertita granito.

Não há um consenso a respeito da proveniência do fluido mineralizante, entretanto Gõni (1961) atribuiu a origem das mineralizações, tanto no CGL como nas

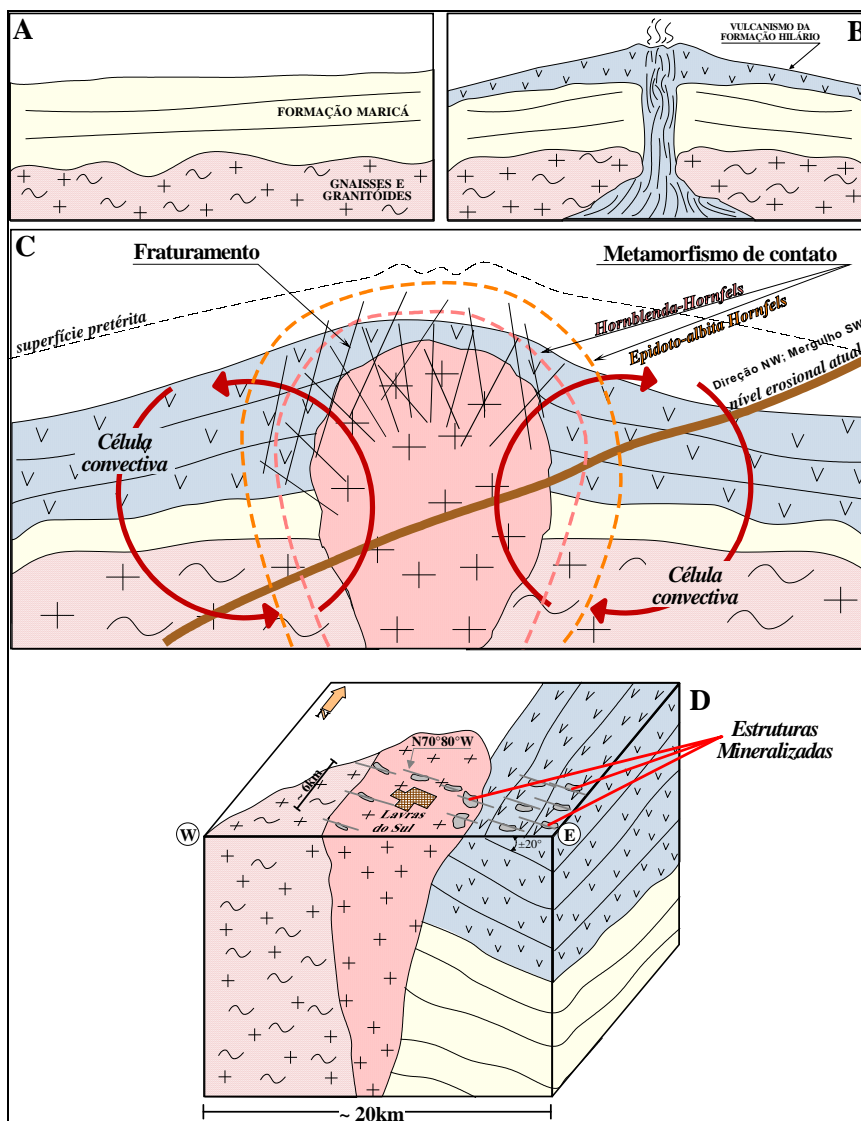
vulcânicas, ao granito e seus efeitos de “difusão iônica”; Reischl (1980) defendeu a origem das mineralizações ao evento magmático responsável pela intrusão dos sienogranitos da borda; Carvalho (1932), Teixeira & Lenz (1942), Kaul & Zir F° (1974) entre outros, atribuíram a origem da mineralização a soluções que teriam ascendido na crosta a partir de fontes magmáticas (CGL e/ou FH). Nardi (1984) atribuiu a geração das soluções hidrotermais à intrusão dos pertita granitos e outras intrusões alcalinas, sendo estas responsáveis pelas mineralizações do CGL, bem como das sequências vulcânicas e sedimentares a leste. Para Mexias (1990), a intrusão granítica teria atuado como fonte de calor na geração e manutenção de um sistema hidrotermal fóssil, responsável pela remobilização e concentração de metais.

Bongiolo et al. (2008), com base em estudos de argilominerais, sugerem que o Distrito de Lavras do Sul foi afetado por um evento hidrotermal de multiestágios. Estes autores apresentam as assembléias características de fácies de alteração fílica e argílica intermediárias, de ambientes do tipo pórfiro e de zonas profundas de depósitos epitermais, respectivamente. A ocorrência de alteração de alta temperatura (alteração potássica ou veios de alta temperatura) e feições de alteração da rocha encaixante no contato entre o granito e as rochas vulcânicas podem indicar níveis mais rasos de um depósito pórfiro a epitermal.

Uma evolução esquemática da geologia da região de Lavras do Sul foi apresentada por Mexias (2000), seguindo quatro etapas (Figura 10):

- i. Deposição dos sedimentos da Formação Maricá sobre um embasamento constituído de gnaisses de metagranitóides, gerando depósitos aluviais, deltáicos e marinho rasos entre 620 e 592 Ma, em uma bacia de retroarco (atrás do arco) da Orogênese brasileira (Chemale Jr., 2000)
- ii. Ocorrência de uma instabilidade tectônica no Neoproterozóico, últimos estágios da Orogenia Brasileira, associada a um processo de magmatismo vulcânico, piroclástico e epiclástico, porém de filiação geoquímica shoshonítica.

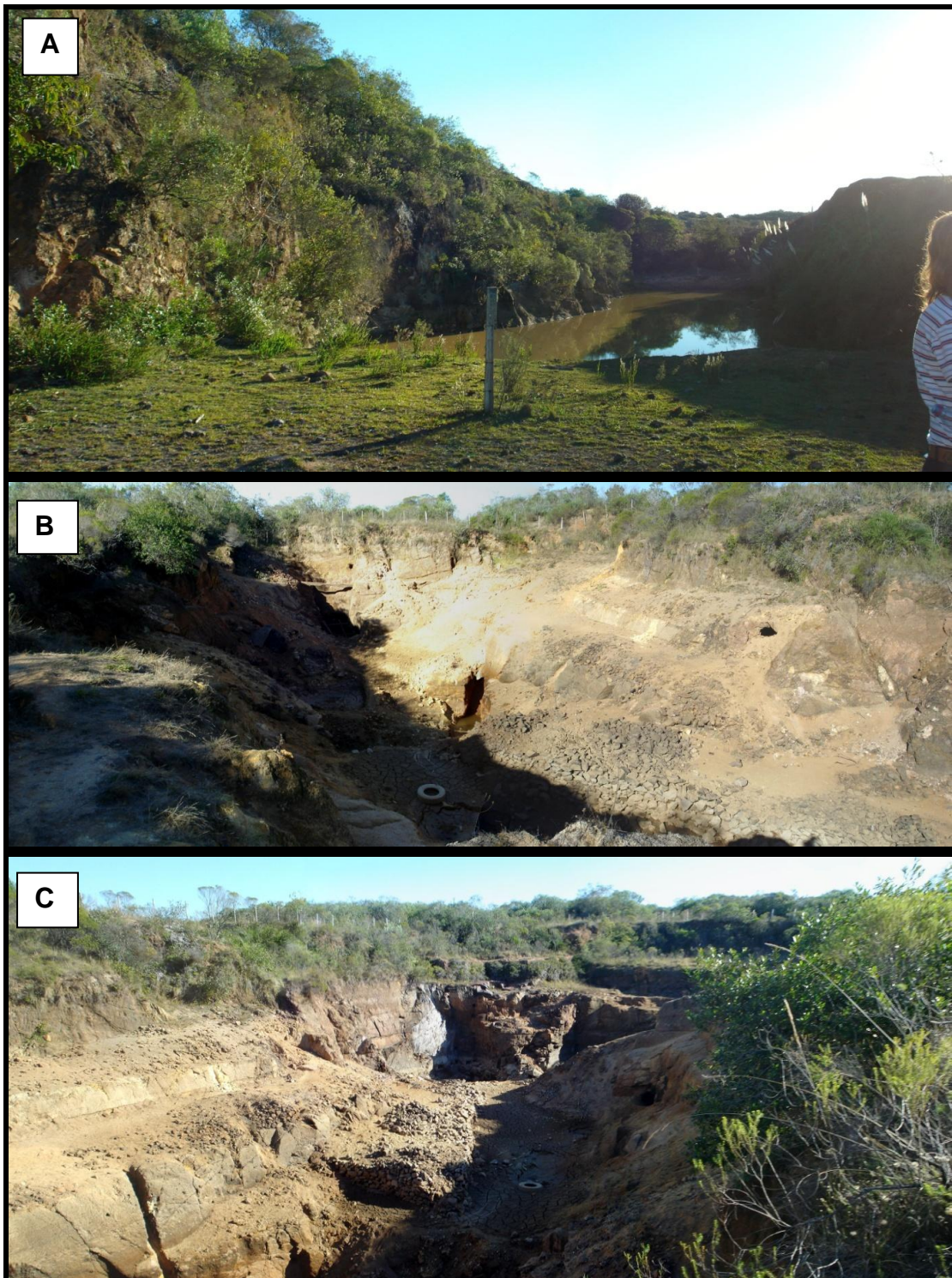
- iii. Intrusão de um complexo de corpos ígneos de caráter plutônico e hipabissal com filiação geoquímica shoshonítica, que geraram importante influência térmica sobre as rochas vulcanogênicas, com metamorfismo de contato atingindo até a fácies hornblenda-hornsfels. É provável que posteriormente tenha havido um evento alcalino porém os dados geocronológicos não são unânimes em indicar que o magmatismo alcalino foi mais recente que o shoshonítico.
- iv. Mineralização com controle estrutural preferencial de N70-80W. O nível erosional da superfície atual é representado por uma seção inclinada com mergulho para SW e direção aproximada NW. As porções oeste e sudoeste podem representar a exposição de rochas formadas em maiores profundidades, mostrando níveis crustais diferentes ao longo da superfície aflorante atual da região.



**Figura 10 - Evolução geológica esquemática para a região de Lavras do Sul proposto e extraído de Mexias (2000).**

O Bloco Butiá está situado na borda do extremo oeste do CILS, em contato com o granodiorito Fazenda do Posto, abrangendo o pertita, o sieno e o monzogranito. As faixas alteradas hidrotermalmente ocorrem preferencialmente nos pertita granitos e ao longo de estruturas EW  $\pm$  20°. Secundariamente, estas faixas alteradas ocorrem também nos sieno e monzogranitos, que por vezes contém mineralizações discretamente dispersas (Mexias, 2000). Nesta área existiram dois grandes prospectos de Au: Mina Bloco Butiá (Figura 10A) e Mina Boa Vista (Figura 8B e C).





**Figura 11 – Antigas minas exploradas como pequenos empreendimentos minerários. A - Antiga Mina do Bloco Butiá. Abandonada em 1938. B e C - Representam a antiga cava da Boa Vista, abandonada em 1940.**

## 2.5 Dados Geocronológicos

Na região de Lavras do Sul, a maioria das datações já existentes são relacionadas as rochas encaixantes do minério e a cronologia do hidrotermalismo ainda é pouco conhecida e explorada. Assim, a relação temporal entre o hidrotermalismo e o magmatismo da região continua em aberto.

Soliani Jr. (1986) realizou a primeira tentativa de datação direta da mineralização por K-Ar em “sericitas” hidrotermais. Para grãos provenientes do pertita granito foi obtida a idade de  $608 \pm 13$  Ma e para minerais dos granitóides do núcleo chegou-se a idade de  $600 \pm 8$  Ma.

Leite (1995) realizou análises U-Pb SHRIMP em zircões do pertita granito e identificou duas populações: (i) idade de  $608 \pm 7$  Ma, interpretada como herdada das fácies do núcleo do CILS, com duas sub-populações texturais de zircões (uma contendo zonação simétrica e outra destituída de zonação); (ii) idade de  $580 \pm 6,6$  Ma, interpretada como idade magmática do pertita granito. Estes mesmos dados foram reinterpretados por Leite *et al.* (1998) obtendo as idades de  $610 \pm 10$  Ma e  $583 \pm 11$  Ma para as mesmas populações de zircões.

Remus *et al.* (1997b) obtiveram, por meio de U-Pb SHRIMP em zircões, idades de  $592 \pm 5$  Ma para os granitoides shoshoníticos do núcleo em grãos com padrões de zonação irregulares/concêntricos e muitas inclusões. Para o pertita granito estes autores identificaram duas populações de zircões: (i) uma de idade  $597 \pm 5$  Ma, em grãos contendo padrões de zonação irregulares e raramente concêntricos no núcleo e zonação concêntrica nas bordas, interpretada como herdada da fácies granodiorítica central e; (ii) uma idade  $580 \pm 7$  Ma, que foi atribuída à cristalização do pertita granito, em grãos prismáticos alongados com faces bem desenvolvidas. Uma reinterpretação destes dados por Remus *et al.* (2000) atribuiu as idades de  $594 \pm 5$  e  $594 \pm 4$  Ma para os granitóides shoshoníticos e alcalinos, respectivamente.

Dados geocronológicos obtidos por Gastal *et al.* (2005) conferem a idade U-PB de  $601,0 \pm 2,0$  Ma para os granodioritos do núcleo e de  $586 \pm 2,8$  Ma para os pertita granitos da borda.

Por U-Pb SHRIMP em zircões hidrotermalizados do pertita granito da área da Mina Bloco Butiá, Mexias (2000) obteve a idade de  $597 \pm 4$  Ma para o magmatismo alcalino e de  $580 \pm 5$  Ma para o evento hidrotermal atuante na área. O mesmo autor também realizou duas datações Rb-Sr em micas brancas fengíticas e as idades variam de  $573 \pm 5$  a  $588 \pm 5$  ( $R_i = 0,705-0,715$ ) e  $583 \pm 10$  Ma ( $R_i = 0,705$ ).

Bongiolo (2002) ao datar o processo de alteração hidrotermal utilizou o método Rb-Sr em grãos de mica branca (fengita e illita) e anfibólio (Fe-actinolita) associados diretamente à zona fílica, zona de mineralização, situados nos granitóides tanto do núcleo quanto da borda do CILS. O autor obteve uma isócrona de referência para o processo hidrotermal de  $582 \pm 6$  Ma.

Até o momento os dados indicam a ocorrência de duas idades principais para o CILS. Uma a 595 Ma, que marcaria o magmatismo, shoshonítico e alcalino, e outra a 580 Ma, que marcaria um evento hidrotermal atuante na região. Apesar de não ser possível fazer uma correlação confiável entre os dois eventos, com a idade obtida de 595 Ma é possível relacionar a idade de 580 Ma a um evento hidrotermal posterior ao magmatismo, ocorrendo de forma independente por meio da reativação de falhas. Existiria, então, um hiato temporal entre o magmatismo e o hidrotermalismo (Bongiolo *et al.*, 2003).

As idades acima citadas estão organizadas em um quadro na figura 12.

MÉTODO	IDADE (Ma)	MATERIAL	REFERÊNCIA
K-Ar em "sericitas" hidrotermais	602 ± 13	pertita granito	Soliani Jr. (1986)
	600 ± 8	granitóides do núcleo	
Rb-Sr em RT	653 ± 34	núcleo	Nardi (1984)
	592 ± 46	transic.	
	554 ± 25	perifér.	
K-Ar em RT	560 ± 25	Cornubianito da FH	Minioli & Kawashita (1971)
K-Ar e Rb-Sr em RT	653 ± 23	vulc. E hipabis. Da ASLS	Lima (1995)
U-PB em Zircão	592 ± 5	granitóides shoshoníticos	Remus et al. (1997b)
	(i) 597 ± 5	pertita granito	
	(ii) 580 ± 7		
U-PB em Zircão	594 ± 5	Rochas shoshoníticas do núcleo	Remus et al. (2000)
	594 ± 4	Rochas alcalinas	
U-Pb SHRIMP em zircões	(i) 608 ± 7	pertita granito	Leite (1995)
	(ii) 580 ± 6,6		
U-Pb SHRIMP em zircões	(i) 610 ± 10	pertita granito	Leite et al. (1998)
	(ii) 583 ± 11		
U-PB SHRIMP em Zircões hidrotermalisados no pertita granito	597 ± 4	magmatismo	Mexias (2000)
	580 ± 5	hidrotermalismo	
Rb-Sr em micas brancas fengíticas	573 ± 5 a 588 ± 5 ( $R_i = 0,705 - 0,715$ )		

	583 ± 10 (R <sub>i</sub> = 0,705)		
Rb-Sr em grãos de mica branca (fengita e ilita) e anfibólio (Fe-actinolita)	582 ± 6	alteração fílica	Bongiolo (2002)
<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U em zircões	586,0 ± 2,8	Pertita granito	Gastal et al. (2005)
<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	598 ± 3	Sienogranito	
<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	601,0 ± 2,0	granodiorito do núcleo	
<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	601 ± 5	Monzonito Tapera	
<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	599 ± 7	Monzodiorito Arroio do Jacques	
<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	567 ± 4	Granito Jaguari (GJ) – evento de natureza alcalina mais jovem	

Figura 12 – Quadro com as principais idades para as rochas da região de Lavras do Sul.

### **3. METODOLOGIA**

---

#### **3.1 Trabalho de Campo**

O trabalho de campo (Figura 13) foi realizado em Lavras do Sul, no período de 19 a 26 de maio de 2012. Foram selecionados 3 furos de sondagem na área do Bloco Butiá, disponibilizados pela empresa de mineração Amarillo Gold Corporation. Durante os primeiros dias foi feita a seleção das caixas de testemunhos que seriam amostradas. A amostragem foi baseada na análise macroscópica do grau de alteração do anfibólio (de leve a fortemente alterado) bem como das feições características da alteração propilítica: o avermelhamento dos feldspatos potássicos, o embranquiçamento do quartzo e a cloritização dos anfibólios. Foi realizada a descrição das estruturas, texturas e mineralogia e, por fim documentação fotográfica. Após a escolha das amostras os testemunhos foram serrados e etiquetados, resultando em um total de 12 amostras (Figura 14). A estas foram acrescentadas mais duas amostras (BB106,6 e BB174,5) do PG hidrotermalizado, cedidas pelo Prof. Dr. André Sampaio Mexias.

Além do trabalho de coleta de amostras, este período de campo serviu para entender o funcionamento da pesquisa de prospecção mineral. Foi possível acompanhar o dia a dia das geólogas que trabalham na unidade da Amarillo Gold em Lavras do Sul (Figura 15), entender os procedimentos de descrição de testemunhos e administração destes dados.

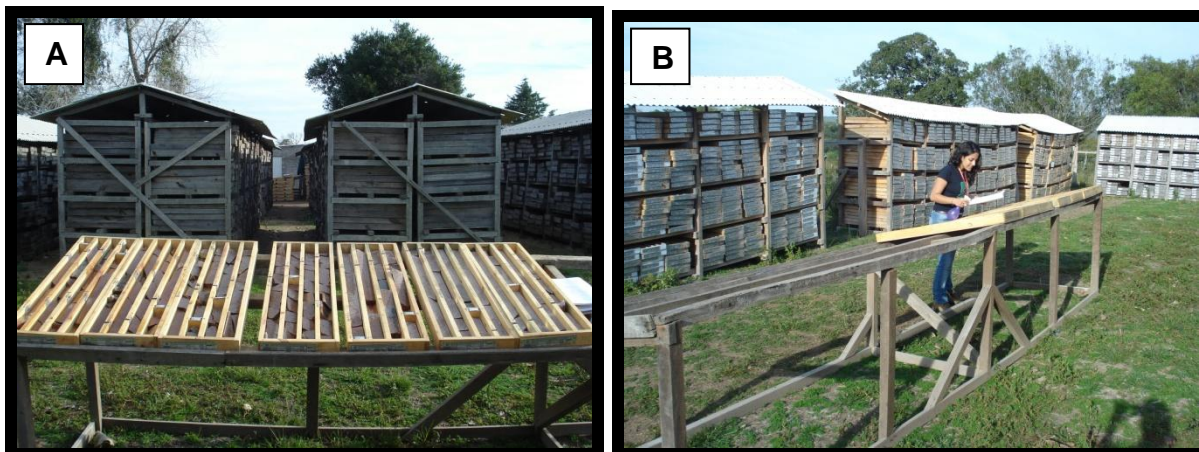


Figura 13 – Fotos do período de trabalho de campo. A-Caixas de testemunho selecionadas. B- Descrição das amostras selecionadas.

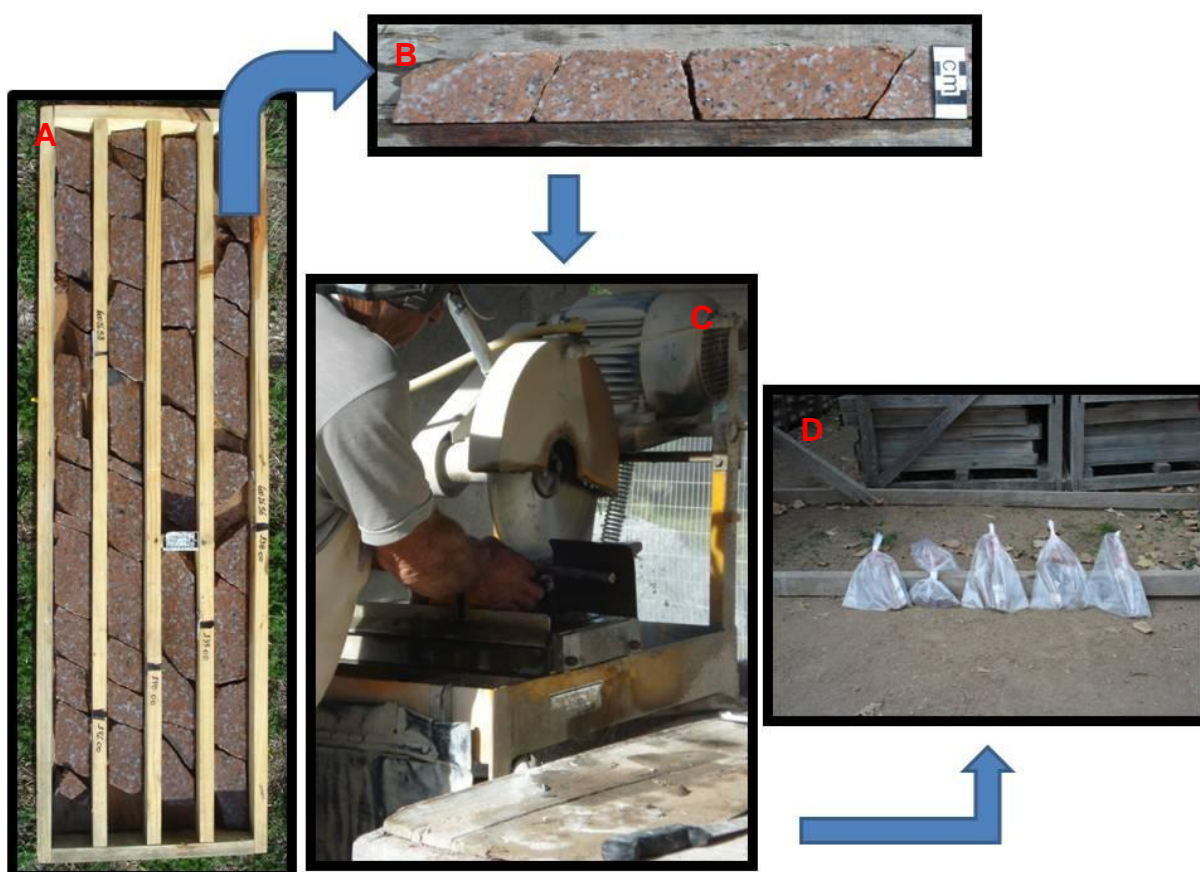


Figura 14 – Esquema ilustrando o procedimento de coletas das amostras, desde a seleção da caixa de testemunho (A), o registro da amostra selecionada (B), a serragem (C) e, por fim, a identificação de cada material amostrado de acordo com o seu furo e intervalo de profundidade (D).



Figura 15 - Foto do galpão de testemunhos da empresa Amarillo Gold Corporation, em Lavras do Sul, RS.

### 3.2 Separação das Monazitas Para Datação Radiométrica

O objetivo deste procedimento foi a separação dos grãos de monazita visando datação pelo método U-Th-Pb em LA-MC-ICPMS. Os métodos escolhidos foram os adotados como padrão no Laboratório de Preparação de Amostras e no Laboratório de Geologia Isotópica do Instituto de Geociências, ambos da UFRGS. Porém devido à dificuldade de encontrar os grãos de monazita foi necessário desenvolver uma alternativa à técnica tradicional de separação do mineral. As etapas de processamento das amostras estão listadas abaixo em forma de fluxograma:

- 1) limpeza superficial da amostra, usando escova e jato de ar comprimido, visando retirar resíduos de qualquer outro material que tenha entrado em contato com a amostra, inclusive outras rochas;
- 2) um pequeno pedaço da amostra é separado para a laminação;
- 3) fragmentar, com auxílio de um martelo, ou então com a prensa hidráulica (para amostras muito grandes), o restante da amostra em pedaços com tamanho aproximado de 5 cm (figura 16A);
- 4) fragmentar a amostra no britador de mandíbulas até que a maior parte fique com tamanho aproximado de ~4 mm (figura 16B);



- 5) fazer o peneiramento em malha de 5 mm e usar somente a fração menor (figura 16C);
- 6) separar cerca de 60 cm<sup>3</sup> para possíveis análises futuras em rocha total;
- 7) moer a fração menor do que 5 mm no moinho de discos (figura 16D);
- 8) fazer peneiramento em malha de 0,5 mm - as frações maiores do que 0,5 mm são passadas novamente pelo moinho até que toda a amostra passe pela peneira (figura 16E);
- 9) colocar a amostra já moída num balde e acrescentar água – esperar decantar e escorrer a água para retirar o material em suspensão;
- 10) bater a amostra, concentrando a fração mais pesada (monazita é um mineral pesado, com densidade de 5,15 g/cm<sup>3</sup>)(figura 16F);
- 11) a amostra concentrada é lavada com álcool e colocada na estufa a cerca de 80°C;
- 12) após bem seca a amostra é passada no separador isodinâmico Frantz - eletroímã cujo campo magnético pode ser controlado através de um amperímetro e assim separa frações de minerais com diferentes magnetismos. Nesta etapa foi adotada uma nova técnica que consistia em posicionar o separador magnético na posição vertical e usar a amperagem máxima do aparelho (~2 A) para retirar o que de mais magnético houvesse na amostra (figura 16G). Caso contrário, quando feita a separação magnética horizontal (frontal: 25°–20°/ lateral: -15°), esta fração altamente magnética poderia prender minerais com um magnetismo menor e assim muito material de interesse poderia ser perdido. A monazita é um mineral não magnético, desta forma utilizamos uma amperagem entre 0,4 até 1,2, para separar frações mais magnéticas e menos magnéticas, respectivamente, durante a separação na horizontal.
- 13) a concentração dos minerais mais pesados em placa de Petri foi feita com a fração menos magnética (figura 16H). Foi utilizado álcool com concentração mínima de 92° INPM e pipeta de Pasteur para retirada das frações mais leves. O processo segue o mesmo princípio da bateia, porém uma escala reduzida, tornando-se necessário o uso de um líquido mais denso como por exemplo o álcool. O

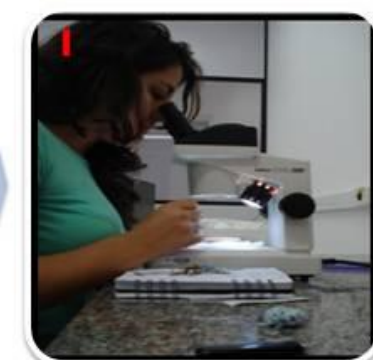
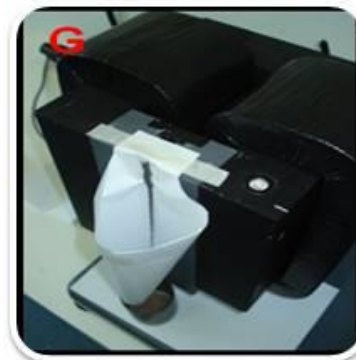
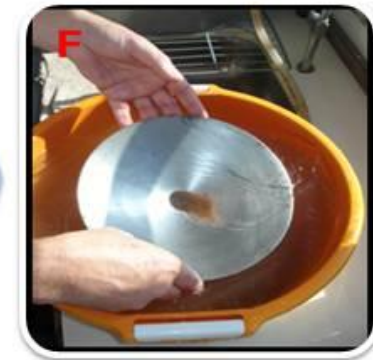
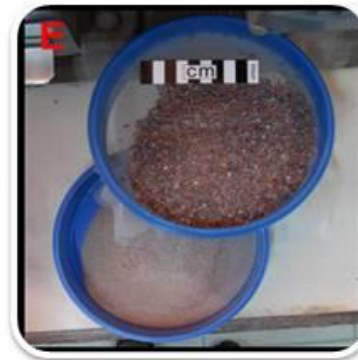
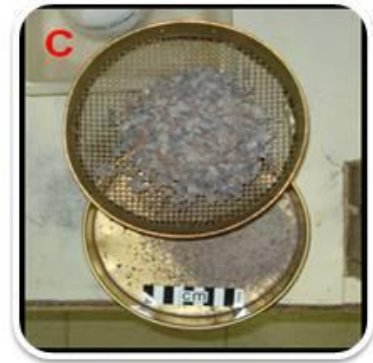
concentrado de minerais pesados é lavado com acetona para acelerar a desumidificação e colocado em estufa a 80°;

**14)** Após secagem, foi feita uma limpeza da amostra com o auxílio de lupa binocular foram retirados grãos de outros minerais que se tinha certeza que não eram monazitas (figura 16I). Em lâmina delgada as monazitas foram identificadas como pequenos grãos de cor alaranjada; desta forma cristais que tivessem esta característica eram reservados. Posteriormente foi verificado que zircões em algumas amostras também apresentavam uma coloração alaranjada, isto dificultou o processo de separação;

**15)** Devido à grande dificuldade de se identificar/catar grãos de monazita com a lupa binocular, utilizou-se um microscópio binocular de luz transmitida para fazer uma melhor seleção do material (figura 16J). A alta birrefringência da monazita foi o critério de seleção utilizado;

**16)** os grãos catados foram colocados sobre uma fita adesiva dupla face (figura 16K), sobre esta foi aderido um milimétrico cilindro plástico e dentro, para resinagem, foram pingadas gotas de uma mistura de resina epóxi e catalisador (figura 16L). Tomou-se muito cuidado para que não haja aprisionamento de bolhas pois isto pode soltar os grãos;

**17)** endurecida a resina, retirou-se a fita sobre os grãos de monazita e o *mount* (figura 16M) foi lixado com lixa 2.500 até a exposição do núcleo dos grãos, após foi feito o polimento com pasta diamantada.



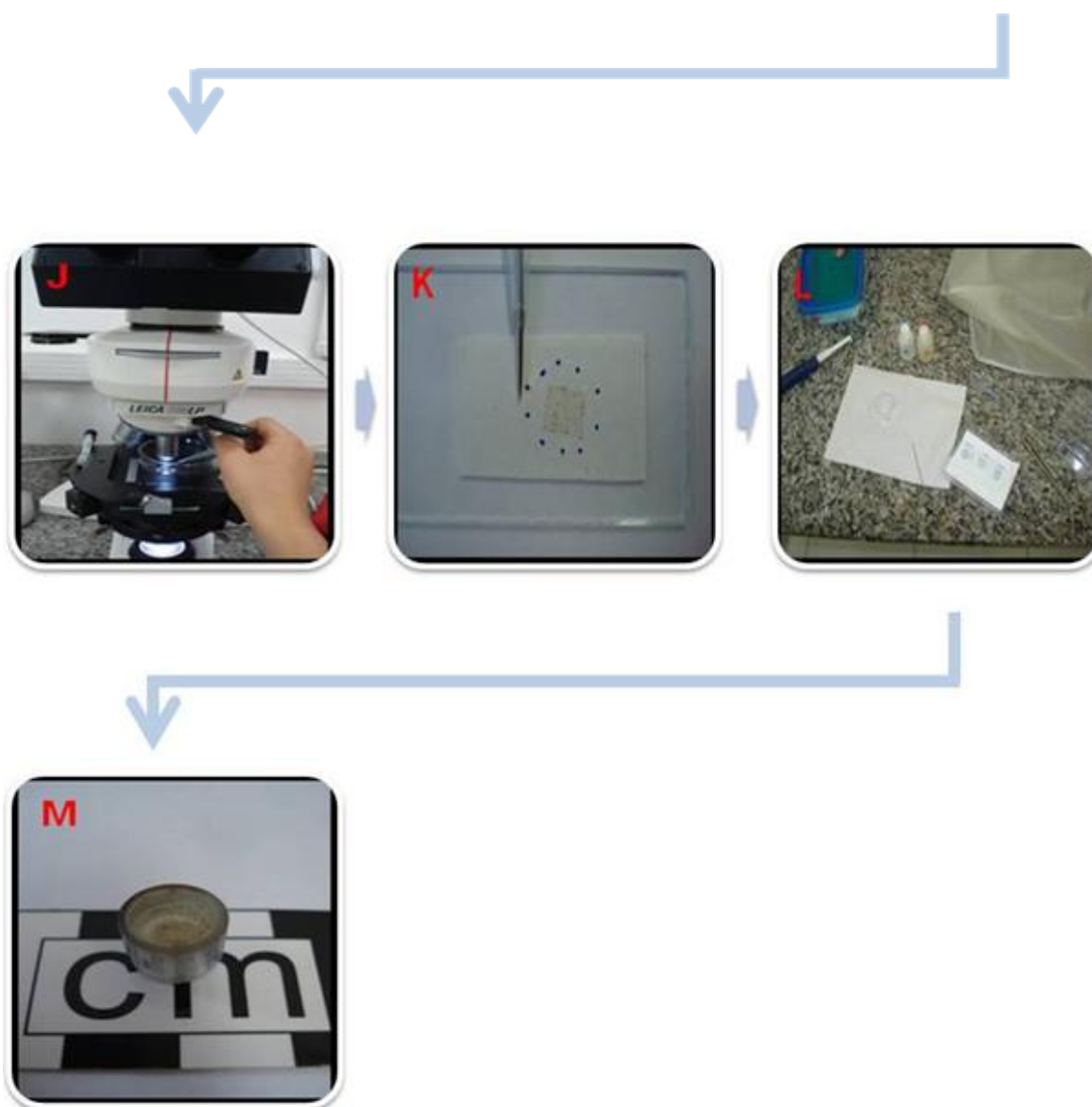


Figura 16 - Sequência de imagens mostrando parte do procedimento de preparação de amostra para análise isotópica em LA-MC-ICPMS. A – amostra fragmentada; B - britador de mandíbulas; C – peneiramento em malha de 5 mm; D – moinho de discos; E – peneiramento em malha de 0,5 mm; F – bateamento; G – separador magnético Frantz na vertical; H – concentração em placa de Petri; I – catação em lupa binocular; J – catação em microscópio de luz transmitida; K – grãos selecionados para análise; L – resinagem; M – *mount*.

### 3.3 Lâminas Delgadas

A petrografia foi uma etapa fundamental no desenvolvimento deste trabalho para que se pudesse avaliar as transformações que ocorreram entre a mineralogia da rocha sã e da rocha hidrotermalizada. Para compreender estas transformações

foi realizado um estudo preliminar através das lâminas utilizadas por Mexias (2000), no qual se detalhou as mudanças que ocorreram na rocha afetada pelo hidrotermalismo, as feições características do tipo de alteração que forma a monazita e a sua forma de ocorrência. Este estudo preliminar serviu para auxiliar a coleta das amostras para o trabalho.

Das 13 lâminas confeccionadas, 12 foram de amostras coletadas no campo e uma cedida de um trabalho anterior de Mexias (2000). Nesta monografia não houve uma descrição para a classificação litológica das amostras, pois esta já foi feita por Nardi (1984), Gastal & Lafon (1998), Mexias (2000), Bongiorno (2002), entre outros. A petrografia visou uma descrição básica das lâminas em microscópio ótico de luz transmitida para a identificação dos cristais de monazita nas amostras e a sua relação com a rocha hospedeira. Além disto, foi feita uma breve abordagem das feições hidrotermais características nessas rochas conforme já descrito pelos autores anteriormente citados.

As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Apoio Analítico e Preparação de Amostras (ANEXO) do Instituto de Geociências da UFRGS. A primeira etapa do processo de laminação foi a demarcação da face escolhida, que tinha como objetivo concentrar o maior número possível de pseudomorfos de anfibólio, já que a monazita ocorre como um dos produtos da sua alteração. Em seguida, utilizando uma serra motorizada com disco de corte diamantado, foi feito o corte no local demarcado para a redução da rocha, em forma de tablete, até o tamanho da lâmina (2,6 x 4,2 cm). Após serrado, o tablete é polido em politriz com disco de alumínio, por pó abrasivo progressivamente mais fino, composto de carbureto de silício, óxido de alumínio e por lixa. Após este processo, o tablete é fixado sobre uma lâmina de vidro com resina. Após a secagem é novamente feito o polimento com abrasivos e lixa até atingir a espessura desejada de 50µm. O restante do material foi preparado para a separação mineral. As descrições macroscópicas foram realizadas em lupa binocular Leica Zoom 2000. As descrições microscópicas foram realizadas em microscópio ótico de luz transmitida Leica DMLP e fotografadas com câmera Leica DC 300F acoplada a este microscópio. Ambos equipamentos fazem parte do LGI, do Instituto de Geociências da UFRGS.

### 3.4 Preparação das Amostras para Difractometria de Raios-X

As análises por difratometria de raios X (DRX) tiveram como objetivo principal caracterizar a mineralogia total nos pseudomorfos de anfibólio. Os resultados obtidos serviram de complemento à petrografia.

Foram analisadas 12 amostras para análise de rocha total (método pó). Esta preparação consistiu em pulverizar os grãos de pseudomorfo de anfibólio das amostras coletadas em campo com o auxílio de uma broca. Tomou-se o cuidado para que não houvesse a contaminação com minerais ao redor do de interesse. O procedimento de preparação da amostra é representado na Figura 17.

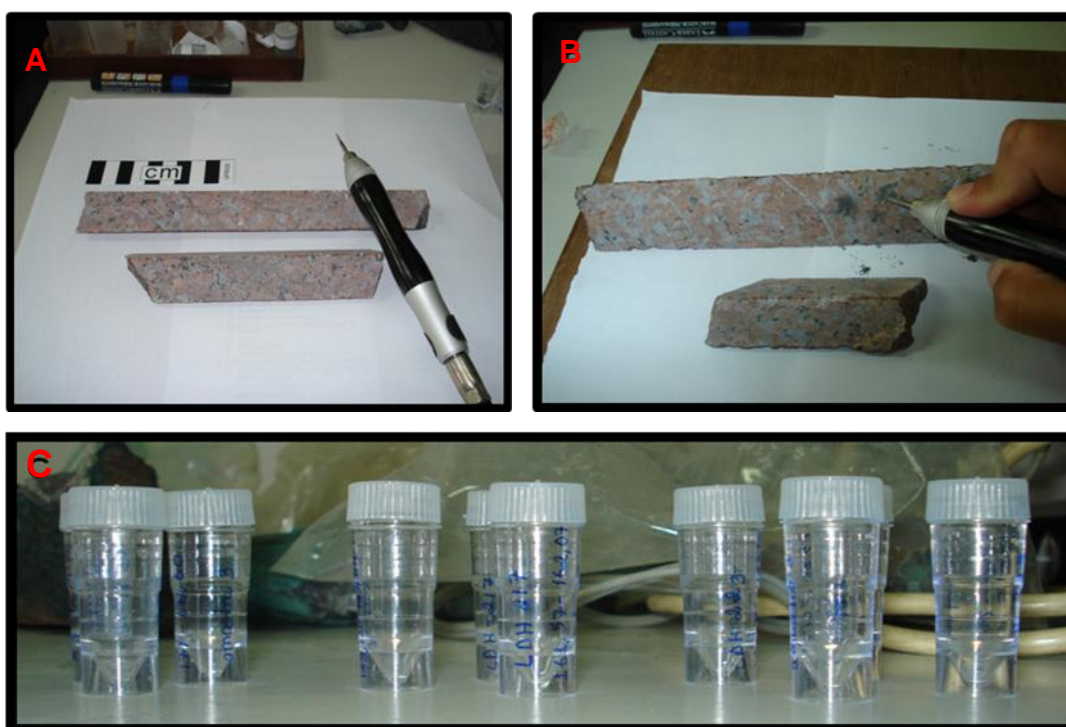


Figura 17 - Procedimento de pulverização dos anfibólios. A - Amostra e a broca de perfuração. B - Pulverização do pseudomorfo de anfibólio. C - Amostras preparadas.

### 3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

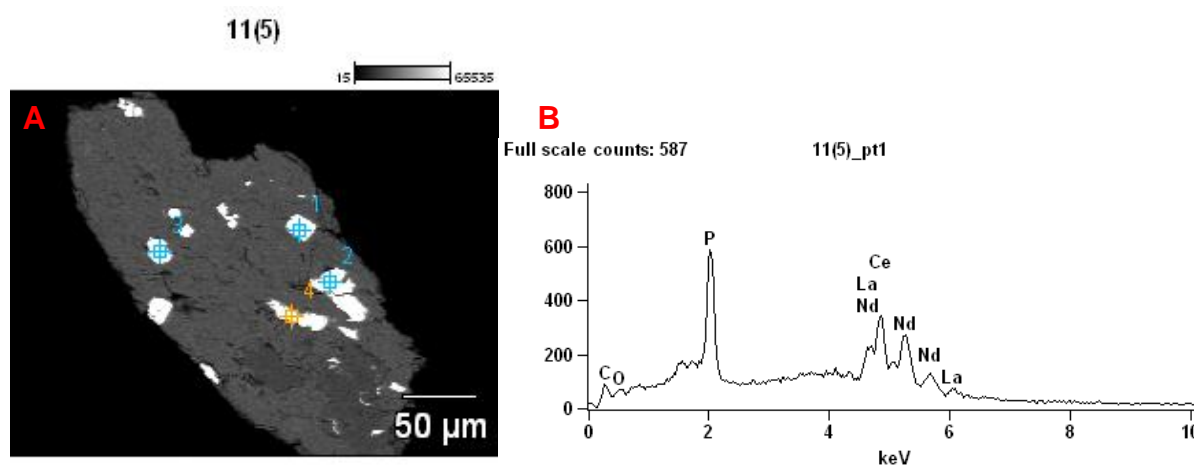
Com a Microscopia Eletrônica de Varredura é possível obter imagens em alta resolução da superfície de uma amostra. Estas imagens podem revelar estruturas microscópicas, tais como sobrecrescimentos e bandamentos composicionais. Além

disto, outro parâmetro de análise muito importante proporcionado pelo MEV é o de poder identificar a presença e a composição de elementos pesados nos minerais analisados. Para a datação de cristais de monazita por LA-MC-ICPMS é fundamental obter previamente o imageamento dos cristais, delimitando regiões com maior concordância em termos de composição química e, além disso, a visualização do contexto do grão na rocha hospedeira.

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo negativo) atrai fortemente e acelera os elétrons em sua direção. O percurso do feixe é corrigido por lentes condensadoras, que o alinham em direção à abertura da objetiva, que ajusta o foco dos feixe antes dos elétrons atingirem a amostra (Reed, 1996).

O impacto do feixe de elétrons primários na superfície amostrada provoca a emissão de uma série de radiações que são coletadas por detectores específicos. As radiações produzidas são: **elétrons secundários ou SEI** (*Secondary Electron Image*), **elétrons retroespalhados ou BSE** (*Backscattered Electron Image*) e **Raios X** característicos. No estudo de monazitas o imageamento mais adotado é o feito por BSE. **Os BSE** são os responsáveis por fornecerem imagens características da variação da composição dos elementos presentes na amostra. Quando o feixe de elétrons interage com o campo elétrico do núcleo do elemento, colisões elásticas ocorrem, resultando em uma mudança na energia do feixe de elétrons (< 1 eV). Como os elementos mais pesados (com maior número atômico) exigem uma maior energia para a atração de elétrons do que os de menor número atômico, esta técnica é utilizada para a identificação de contrastes entre elementos. Assim, os minerais formados por elementos com número atômico maior, geram imagens em tons mais claros do que os minerais formados por número atômico menor, revelando feições como zoneamento químico ou frentes de reação no cristal (Figura 18A). Os BSE são fundamentais para o imageamento de monazitas e delimitação da área de ocorrência quando imageados em lâminas, pois a sua composição isotópica é quase que inteiramente formada por elementos pesados. Os SEI não serão necessários

neste trabalho porque fornecem apenas imagens da topografia da superfície amostrada. Somado a utilização dos BSE, a detecção dos raios-x fornece informações semiquantitativas a respeito da composição química do mineral analisado. Os **Raios x (EDS) (energy dispersive x-ray detector)** são energias características emitidas pelas mudanças de níveis energéticos quando o feixe de elétrons incide sobre um mineral. O feixe interage com as camadas de elétrons dos átomos arrancando o elétron de seu orbital, ocasionando uma vacância e deixando o átomo como um íon. Instantaneamente, com a emissão de uma energia de transição característica o átomo retorna ao seu estado normal. Esta energia liberada pela mudança de nível é captada por meio de um detector chamado EDS, que faz uma análise espectral dos raios X. Esse tipo de análise concede informações químicas qualitativas e semiquantitativas que, geralmente, são suficientes para a identificação de minerais desconhecidos (Figura 18B).



**Figura 18 - Análise em MEV realizada na amostra 111,0. A) imagem de BSE com os pontos de EDS. B) perfil com os elementos identificados pelo EDS.**

Na Etapa pré-campo, foram selecionadas duas lâminas delgadas de Mexias (2000), com o objetivo de identificar a presença ou não de monazita nas rochas da área de estudo, suas relações texturais com o mineral hospedeiro, sua forma de ocorrência e possíveis zonações. As lâminas passaram por um processo de metalização por carbono, procedimento aplicado a materiais não condutores, para que no momento de incidência do feixe, os elétrons sejam conduzidos através da



amostra. As análises foram feitas no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS (CME – UFRGS) utilizando o MEV modelo JEOL JSM 5800 com EDS acoplado (Figura 19). Este microscópio opera numa tensão que pode variar de 0,1 a 30 kV com resolução máxima de 3,5 nm.



Figura 19 - MEV modelo JEOL JSM 5800 com EDS acoplado. Centro de Microscopia Eletrônica/UFRGS.

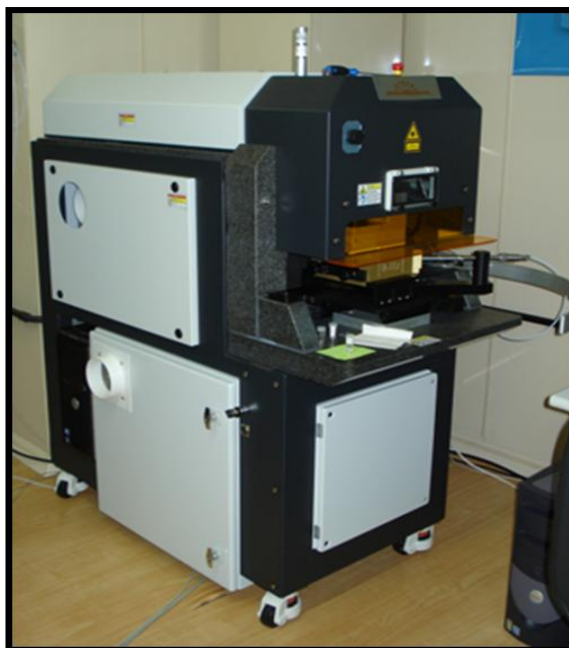
### 3.6 Análise U-Th-Pb em Monazita

A espectrometria de massa é uma ferramenta utilizada para detecção de elementos em ppm (partes por milhão) e ppb (partes por bilhão), sua função é, basicamente, separar partículas (átomos ou moléculas) com base em suas massas e em seus movimentos dentro de campos magnéticos e elétricos. No caso de dois isótopos em uma mesma amostra, ele detecta a abundância relativa, em número de átomos. A separação dos íons é feita pela diferença entre massa e carga de átomos ionizados sob a ação combinada dos campos elétrico e magnético. Assim, quanto mais pesada for uma partícula, menos a sua trajetória será modificada, chegando separada ao final do tubo analisador.

As razões isotópicas de U, Th e Pb das monazitas foram medidas utilizando um MC-ICPMS (Neptune, ThermoFinnigan) (Figura 21) do Laboratório de Geologia

Isotópica da UFRGS, com um Excimer Laser Ablation acoplado (Figura 20) de comprimento de onda de 193nm. Tal metodologia possibilita datações mais rápidas e sem risco de contaminação, porém com uma precisão menor em relação à metodologia tradicional de dissolução isotópica de grãos com TIMS (Espectrômetro de Massa com Ionização Térmica). A precisão menor é compensada por análises em um grande número de grãos, o que permite obter idades de boa confiabilidade. O método U-Th-Pb *in situ* fornece uma excelente resolução espacial, de forma rápida e com bom grau de acurácia e precisão. que perfura a superfície do grão, possibilitando a escolha mais adequada da região do cristal para a datação. Não necessita da abertura isotópica dos minerais através de ácidos, o que reduz consideravelmente o risco de contaminação laboratorial, sendo independente de um laboratório químico super limpo. É um método ágil na velocidade de obtenção dos resultados e, principalmente, na possibilidade das micro-análises serem efetuadas *in situ*.

A ablação dos grãos foi realizada com *spots* em média de 30  $\mu\text{m}$ , porém muitas vezes foi adequado no momento da análise com base no tamanho dos grãos de monazita e inclusões; assim, em algumas análises o *spot* chegou a 20  $\mu\text{m}$  e 15 $\mu\text{m}$ , com energia de 3,0 a 5,3 J/cm<sup>2</sup> e frequência variando de 7-10Hz. As partículas desagregadas pelo laser foram carregadas por um fluxo de He (~0,40 L/min) e Ar (~0,80 L/min). As amostras foram analisadas em seções seguindo a sequência de 1 branco, 1 padrão, 4 análises, 1 branco e 1 padrão, com condições analíticas variáveis. Esse modelo de análises garante que os dados obtidos tenham as razões corrigidas segundo a razão obtida para o **padrão internacional de monazita 44069**, cujos valores são reduzidos de um branco analisado a cada seção. Todas as análises foram corrigidas em relação ao valor de <sup>204</sup>Pb (Pb comum) medido a cada *spot* analisado. Os valores de branco são subtraídos das leituras do conjunto. O valor do <sup>204</sup>Pb é corrigido para <sup>204</sup>Hg, para estimar o chumbo comum. O sinal do <sup>204</sup>Pb varia intensamente e é afetado fortemente pela presença do <sup>204</sup>Hg proveniente dos gases de Ar e He, o que resulta em uma estimativa imprecisa do Pb comum. As idades foram corrigidas usando o software ISOPLOT (Ludwig, 2003).

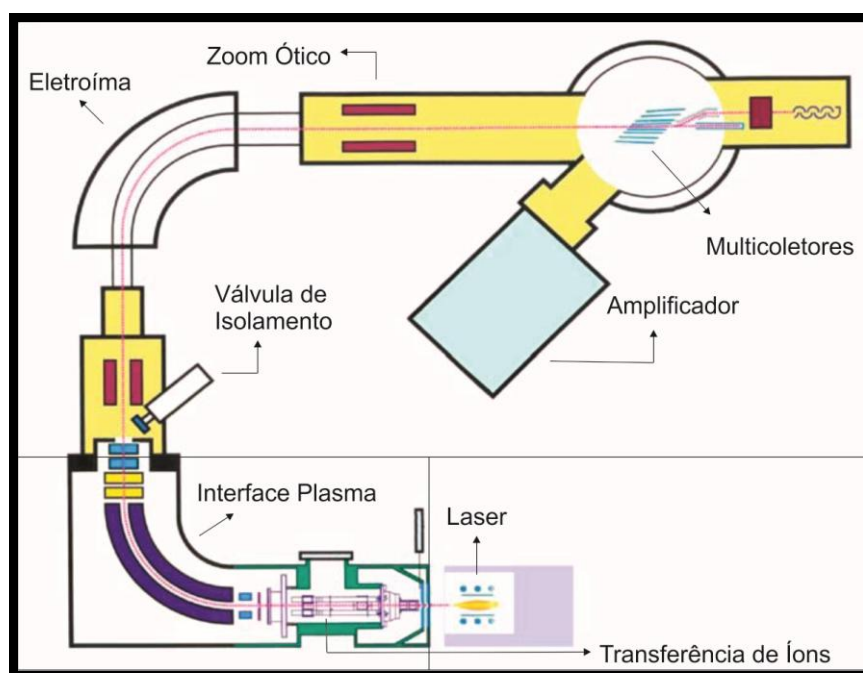


**Figura 20 - Laser Ablation do Laboratório de Geologia Isotópica do CPGq – IG/UFRGS.**



**Figura 21 - MC-ICPMS do Laboratório de Geologia Isotópica do CPGq – IG/UFRGS.**

Os íons são transmitidos até o espectrômetro de massa atravessando janelas colimadoras em direção ao campo magnético gerado por um eletroímã. Esses campos magnéticos, que funcionam como um filtro de massas, deflexionam o feixe de íons. O eletroímã é posicionado de forma que as linhas do campo magnético sejam perpendiculares à direção de trajetória dos íons em direção ao espectrômetro de massa. A razão massa/carga identifica a composição do elemento e a intensidade é relacionada com a concentração. Os espectrômetros de massa mais modernos, como o que foi utilizado neste trabalho, possuem multicoletores para o registro simultâneo de íons de diferentes massas, o que aumenta a precisão dos resultados. A sequência da análise pode ser visualizada na Figura 22.



**Figura 22 - Desenho esquemático de um LA-MC-ICPMS do modelo Neptune da Finnigan, mostrando sua configuração básica, desde o laser que extrai material do grão de monazita, passando pela interface plasma que ioniza o material previamente extraído, pelo eletroímã que separa as massas, até os multicoletores. Extraído e modificado de Finnigan Neptune Hardware Manual.**

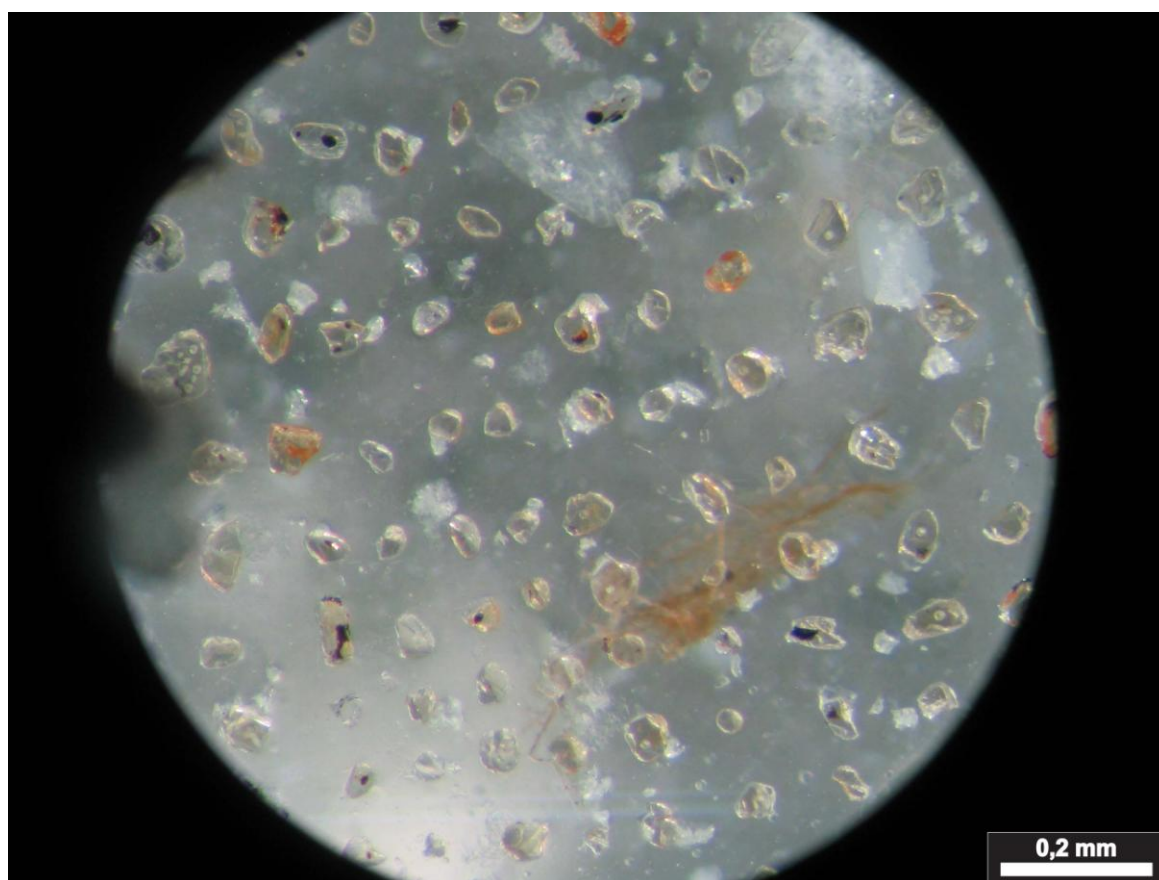
### 3.7 Padrão Internacional 44069:

O padrão 44069 corresponde a grãos de monazita metamórfica proveniente de um metapelito, metamorfisado na fácies anfíbolito superior, do Complexo

Wilmington, Delaware, USA (Aleinikoff et al., 2006). Estas monazitas são uniformes tanto na forma, de discóide a subédrico de em média 100µm de diâmetro, como na cor amarelo pálido. Imageamentos por BSE revelaram uma monazita não zonada, o que indica homogeneidade química. Durante o desenvolvimento de análises SHRIMP (Aleinikoff et al., 2006) neste padrão, foi observado uma grande uniformidade de razão entre os radiogênicos e respectivos isótopos pais, da mesma forma que razões  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Então, para avaliar a qualidade desta monazita como um potencial padrão, ela também foi datada por TIMS. Análises  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ID-TIMS produziram uma idade de  $429\pm 2$  Ma, que se mostraram concordantes e consistentes com as  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  SHRIMP  $426\pm 3$  Ma (Aleinikoff et al., 2006).

Hoje esta monazita é amplamente utilizada como padrão geocronológico U/Pb para análises SHRIMP e LA-MC-ICPMS (por exemplo: Peterman, 2005; Tollo et al, 2006; Gerbi e West, 2007; Alagna et al, 2008; Pullen et al, 2008; Liu et al, 2012; Peterman et al, 2012).

As razões do padrão utilizadas para o cálculo das monazitas hidrotermais estudadas neste trabalho foram retiradas do artigo Aleinikoff et al. (2006).



**Figura 23 – Mount de monazita padrão 44069.**

### **3.8 Difractometria de Raios - X (DRX):**

As análises por difratometria de raios-x tiveram como objetivo principal a identificação da mineralogia total associada aos pseudomorfos de anfibólio. Isto se deve ao fato de a monazita ocorrer como um dos produtos de alteração da fase máfica presente no pertita granito hidrotermalizado; dessa forma ela poderia ser detectada na análise. Alguns cristais de anfibólio das amostras coletadas em campo foram pulverizados com o auxílio de uma broca e o pó depositado no sulco de uma lâmina de vidro. Para assegurar que todos os minerais ou estruturas cristalinas fossem analisados, procurou-se evitar qualquer tipo de orientação das partículas

O material foi analisado no Laboratório de Difractometria de Raios X do CPGq, IGEO/UFRGS por meio do equipamento SIEMENS D5000 com radiação  $\text{CuK}\alpha$ , 40kV e 30 mA (Figura 244). Este equipamento contém um goniômetro com sistema  $\theta$ - $\theta$ , controlado por computador. Os padrões de DRX são obtidos numericamente e

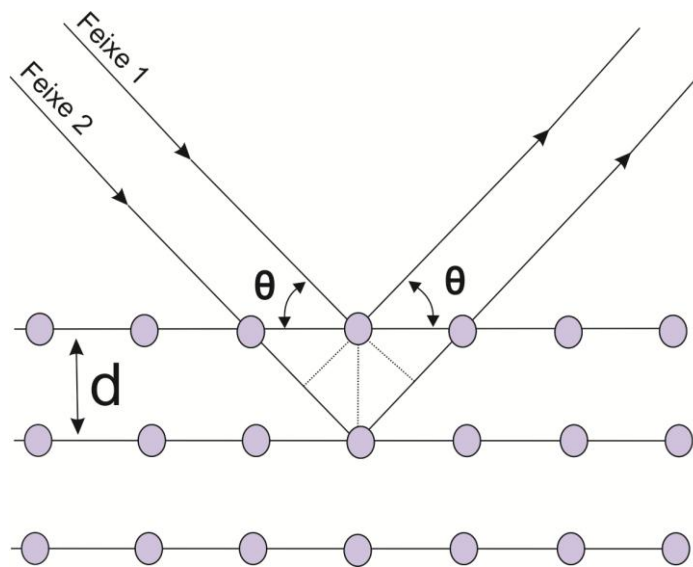
tratados através do DIFRAC-PLUS. As amostras foram analisadas segundo o programa **pó.dqi**, que varre a amostra em um intervalo de  $2^\circ$  a  $72^\circ 2\theta$  a uma velocidade de 2 segundos para  $0,02^\circ$  a uma amperagem de 30 mA.



**Figura 24 - Difratorômetro SIEMENS D5000 do Laboratório de Difratorometria de Raios X no Instituto de Geociências da UFRGS.**

A técnica de difratometria de raios-x é utilizada para medir as distâncias interplanares na estrutura dos minerais, a partir de um feixe de radiação monocromática em um material cristalino, com a finalidade de se obter a identificação das fases presentes na amostra. Os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades de átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada cristal. Desta forma, um composto pode ser identificado comparando os espaçamentos interplanares e as intensidades dos picos da amostra com os padrões de DRX (banco de dados).

A relação entre o comprimento de onda do sinal de raios-x ( $\lambda$ ), o ângulo de difração ( $2\theta$ ), e a distância ( $d$ ) entre cada conjunto de planos atômicos do reticulado cristalino é obtida pela **Lei de Bragg**,  $n\lambda = 2d \text{ sen}\theta$ , onde  $n$  representa a ordem de difração,  $\theta$  representa o ângulo de incidência do raio X (Figura 25) .



**Figura 25 - Representação dos planos cristalinos e das ondas de raios x incidentes, segundo a Lei de Bragg (modificado de Cullity & Stock, 2001).**

A DRX tem sua vulnerabilidade no limite de detecção, ou seja, como trabalha com a caracterização de estruturas, substâncias amorfas ou pouco cristalinas não são identificáveis. Na interpretação de um difratograma deve-se observar que podem ocorrer picos muito próximos e que pertencem a diferentes minerais, o que pode gerar erro se não interpretados corretamente. Outro problema enfrentado é ocorrer fases modais abaixo do limite de detecção do aparelho, o que pode ocasionar uma interpretação equivocada de não ocorrência do mineral.

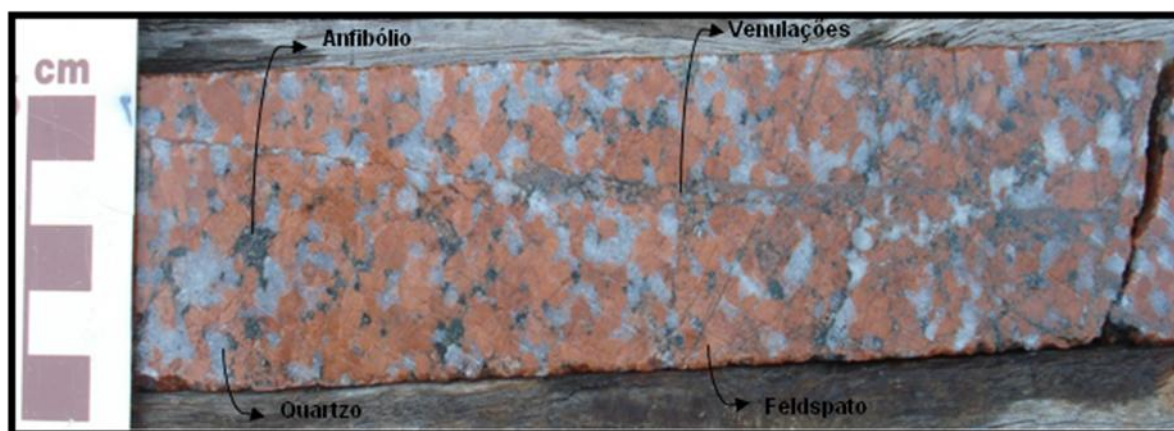


## 4. RESULTADOS

---

### 4.1 Petrografia

Em todas as amostras foram identificadas feições hidrotermais. Macroscopicamente as evidências são representadas pelos grãos de K-feldspato avermelhados, grãos de quartzo esbranquiçados pelas trilhas de inclusões fluídas, pela transformação pseudomórfica do anfibólio em clorita e, subordinadamente, em outros minerais que não são possíveis de identificar a olho nu. Venulações preenchidas por quartzo, clorita e, por vezes, carbonatos, marcam os aspectos estruturais da maioria das amostras. Em algumas destas também é possível identificar pirita associada à mineralogia citada. Na Figura 26 é possível visualizar estas feições características.

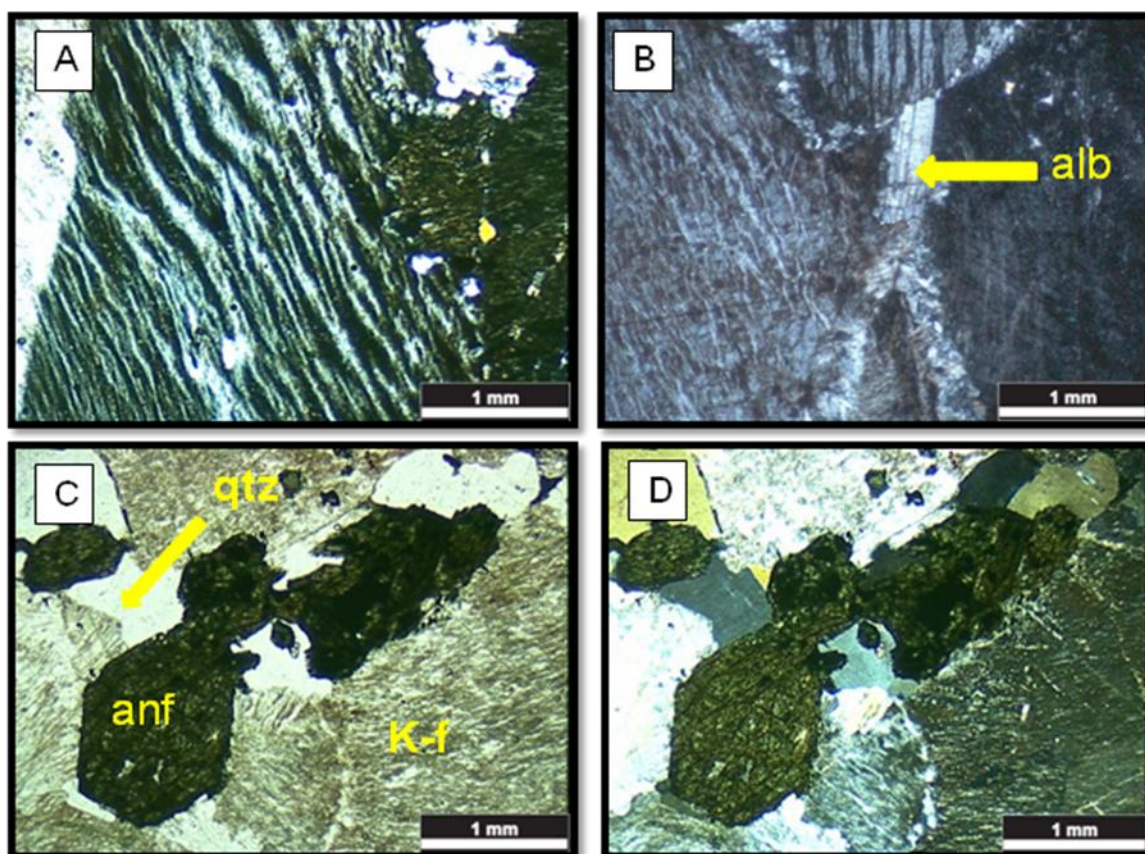


**Figura 26 - Aspecto macroscópico do Pertita Granito hidrotermalizado do Bloco Butiá afetado pela alteração propilítica (amostra BB 2-2). Trama granítica bem preservada. Pequenas pontuações negras são os grãos de pseudomorfos de anfibólios. Avermelhamento dos feldspatos e embranquiçamento do quartzo são feições características da propilitização.**

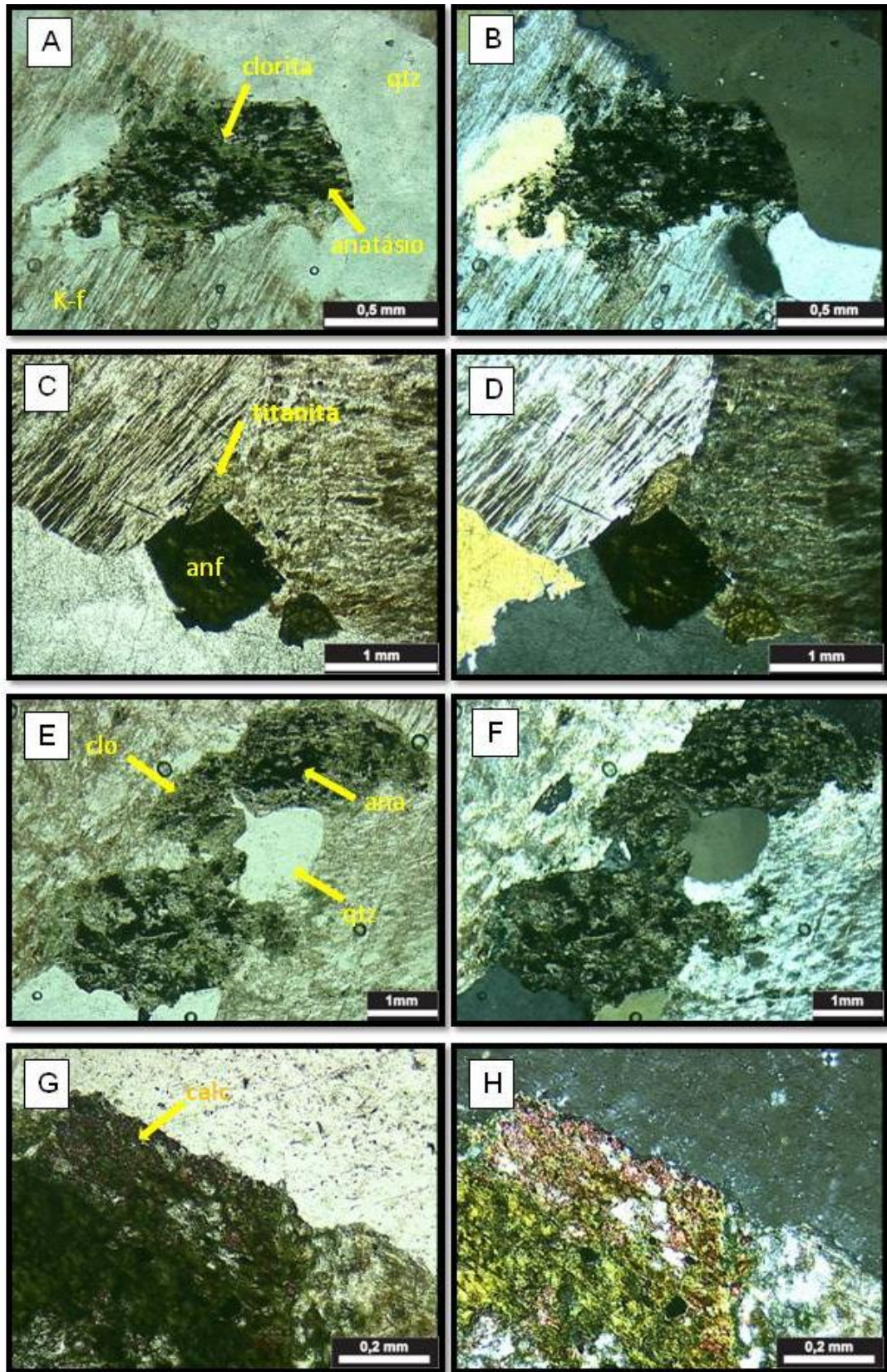
Microscopicamente a rocha mantém os contatos nítidos entre os grãos (figura 27C e D), principalmente entre quartzo e feldspato alcalino, ambos mantendo a forma primária. Em alguns locais estes contatos são marcados por albite intersticial de origem magmática (figura 27B) com 0,2-0,8mm, frequentemente maclada. O feldspato alcalino é anédrico a subédrico com 3-9 mm, possui preservada a sua textura pertítica magmática tipo *pele de tigre* (figura 27A); sobre alguns é encontrada uma alteração discreta por mica branca, fluorita e argilominerais concedendo um aspecto turvo ao mineral. Os grãos de quartzo são anédricos a subédricos, com tamanho entre 1-8mm, a extinção ondulante é muito comum.

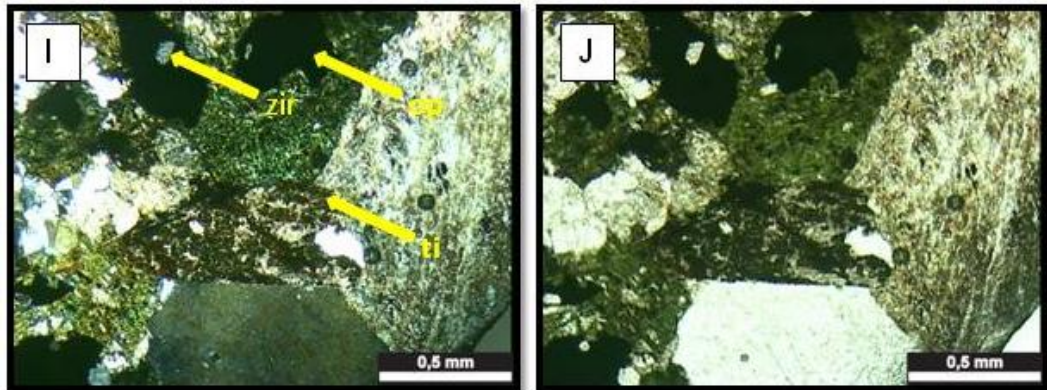
O anfibólio, classificado por Nardi (1984) como Fe-edenita, tem entre 1-4,5mm. A cloritização destes anfibólios é uma das transformações típicas destas amostras; ainda é possível observar o contorno dos antigos grãos (figura 28A e B), porém, internamente são identificados clorita, quartzo, calcita, anatásio e monazita. Em amostras como BB7-3 e BB7-5, ainda é possível observar inclusões de minerais opacos, zircão e titanita (figura 28C, D, I e J). A clorita ocupa a maior parte do pseudomorfo de anfibólio, com pleocroísmo em tons de verde e birrefringência *berlin-blue* característica. O quartzo ocorre como pequenos grãos dispersos arredondados (figura 28 E e F) e, por vezes, é observada uma certa tendência de grãos de quartzo se conectarem mutuamente, o que é melhor visualizado macroscopicamente. A calcita, anédrica, ocorre de forma intersticial à clorita (figura

28 G e H). Em algumas amostras, como na BB 7-5, são encontrados pseudomorfos de titanita com pequenos cristais de carbonato rico em terras raras (figura 28 I e J) que geralmente ocorrem em contato com o pseudomorfo de anfibólio e, por vezes, inclusos nos mesmos. O anatásio ocorre como poucos grãos isolados com forma bastante irregular. Associado à assembléia hidrotermal citada, ocorre a monazita, um mineral alaranjado a luz natura (LN), em média menores que 0,05 mm. De forma geral ocorre como cristais anédricos com uma forma levemente oblata, formando pequenos agregados de 3 a 8 grãos contendo eventuais inclusões de óxidos de Fe e Ti; como pode ser visualizado na figura 29. As suas características químicas serão discutidas nos itens a seguir, juntamente com os dados geocronológicos.



**Figura 27 – Fotomicrografias do pertita granito alterado propilicamente que preserva as feições magmáticas. A e E à luz natural e B, C, D e F à luz polarizada. A– feldspato alcalino com textura pertítica, B– albita intersticial, C e D – mostram a estrutura granítica preservada, com contato nítido entre os grãos. (amostras: A e B – BB 7-1; C - BB 7-1; D- BB7-4).**





**Figura 28 – Fotomicrografias dos produtos de alteração do anfibólio. A e B – cloritização do anfibólio. C e D – titanita primária. E e F – cloritização do anfibólio restando quartzo, anatásio e clorita. G e H – calcita em rosa, tingida com alizarina, alterando o anfibólio. I e J – pseudomorfos de titanita com pequenos cristais de carbonato rico em terras raras. A, C, E, G e J à luz natural e B, D, F, H e I à luz polarizada. (amostras: A e B – BB7-1; C e D – BB7-3; E e F – BB7-1; G e H – BB7-4; I e J – BB7-5)**

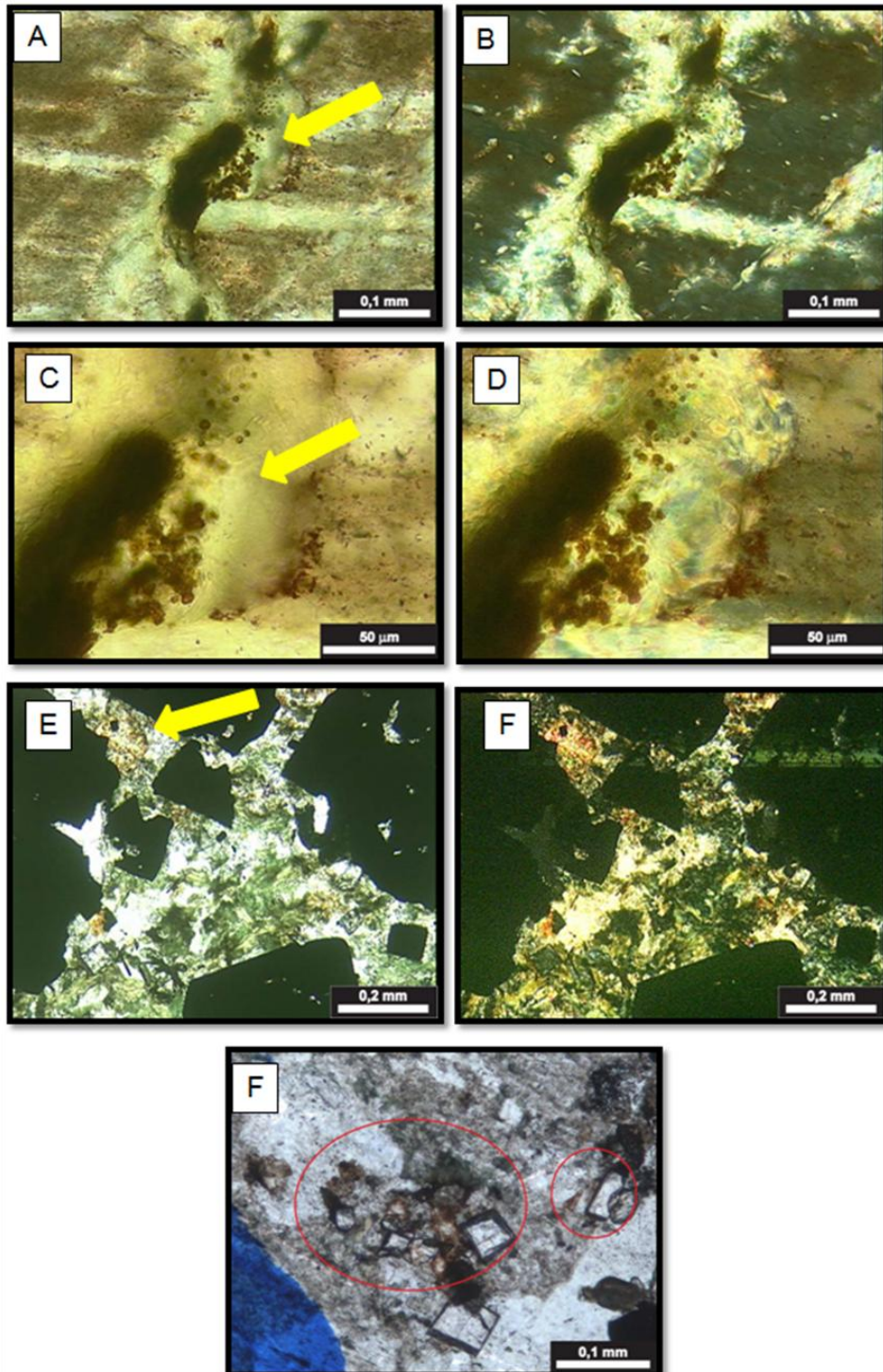


Figura 29 – Fotomicrografias de monazitas hidrotermais. A,C, D, E e G à luz natural e B, D e F à luz polarizada. A, B, C e D - Aglomerados de monazita associada a anatásio em meio a venulação de mica branca. E e F – seta amarela indica o grão de monazita em meio a alteração do anfibólio. F - nos círculos em vermelho as pequenas manchas alaranjadas são grãos de monazitas em meio a zircões.

#### 4.1.1 Difractometria de Raios X

As análises de DRX de rocha total foram realizadas em doze (12) amostras de pertita granito hidrotermalizado e tiveram como objetivo a caracterização da mineralogia total nos pseudomorfos de anfibólio. Os difratogramas com a mineralogia identificada para cada amostra encontram-se no anexo I e os resultados estão organizados sobre a forma de tabela na figura 30.

Os difratogramas produzidos caracterizaram a presença de minerais de maior cristalinidade e expressão percentual. Em algumas amostras foi identificada a presença de minerais primários, como o anfibólio e albita. Como minerais de alteração foram identificados quartzo, anatásio e calcita. Parte do quartzo detectado pode ser contaminação, por também estar na mineralogia essencial do PG. A presença de minerais hidrotermais (filossilicatos) é observada nos baixos ângulos e foram identificados em algumas amostras analisadas (caulinita, illita e esmectita). Essa caracterização serviu para atestar a presença de minerais formados durante o processo hidrotermal, alguns também identificados em lâmina, comprovando desta forma a presença, pelo menos qualitativa, de fluidos nas amostras.

A monazita, assim como outras fases acessórias, não foram identificadas pela difratometria de raios-x porque ocorrem em concentrações muito baixas e até mesmo pouco cristalinas, não detectáveis pelo equipamento.

	Quartzo	Clorita	Anfibólio	Anatásio	Albita	Calcita	Caolinita	Esmectita	Ilita
BB7-1	X	X			X	X			
BB7-2	X	X	X	X	X				
BB7-3	X	X			X	X			
BB7-4	X	X	X		X	X	X	X	
BB7-5	X	X			X	X			
BB2-1	X	X	X		X	X			
BB2-2	X	X			X				X
BB2-3	X	X	X		X				
BB3-1	X	X	X		X	X			
BB3-2	X	X			X	X	X		
BB3-3	X	X			X	X			
BB3-4	X		X			X	X		

Figura 30 – Quadro mostrando as amostras analisadas em DRX e os principais minerais detectados.



## 4.2 Características da Monazita

As monazitas apresentam-se em sua maioria anédricas, com apenas poucas com forma oblata, semelhante a uma bolacha, típica desse mineral. À LN são translúcidas e apresentam coloração alaranjada, alto relevo e birrefringência muito elevada, feições características que ajudaram a identificá-las e que podem ser evidenciadas na figura 31. Frequentemente ocorrem em pequenos aglomerados de, em média, 2 a 8 grãos. Seus tamanhos variam de 25  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  (figura 32A, G e F) de diâmetro, com raros grãos com 200  $\mu\text{m}$ . Comumente ocorrem associadas à paragênese hidrotermal composta por anatásio, clorita e calcita, formada a partir da alteração do anfibólio primário. Oticamente não parece ter nenhum tipo de estrutura interna nem mesmo fraturas; por vezes foram identificados intercrescimento de óxido (possivelmente o anatásio).

Imageamentos por BSE revelaram cristais homogêneos, sem sobrecrescimentos ou zoneamentos, como pode ser visto nas imagens da figura 32, afetados apenas por pequenas fraturas espalhadas por todo o grão (figura 32 A, E e J). De modo geral, as monazitas não mostram sinais de nenhum tipo de estrutura.

A composição química mineral dos grãos separados para datação foi obtida por EDS associado ao imageamento de BSE. Embora esse método seja semi-quantitativo, os resultados permitiram identificar que as monazitas hidrotermais estudadas possuem composição química enriquecida em Ce, Nd e La, razão Th/U alta e não mostram variação química significativa (ver espectros de EDS na figura 32). Estes dados permitem classificar estas monazitas como Ce-monazita. As imagens BSE e os dados de EDS das monazitas analisadas estão apresentados abaixo.

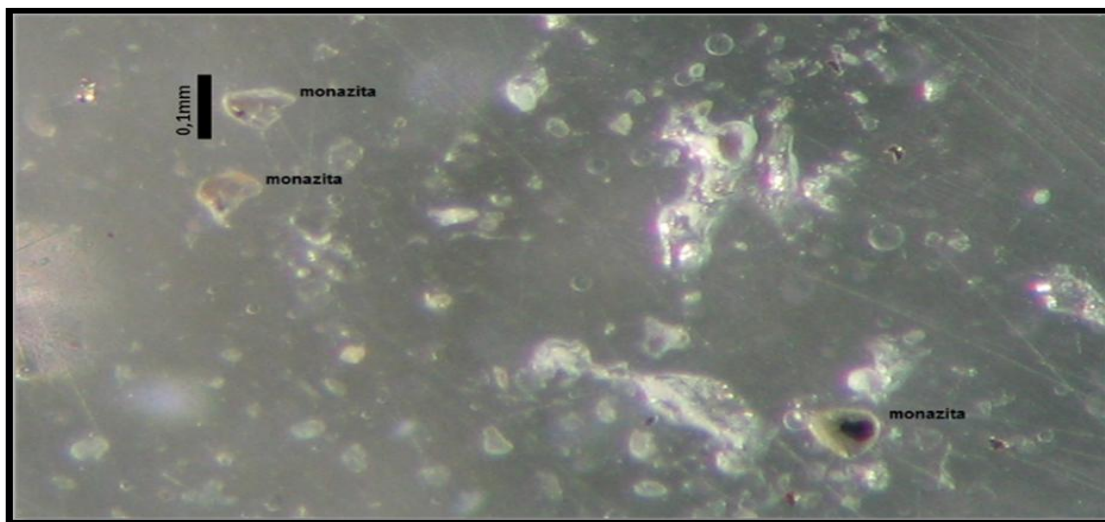
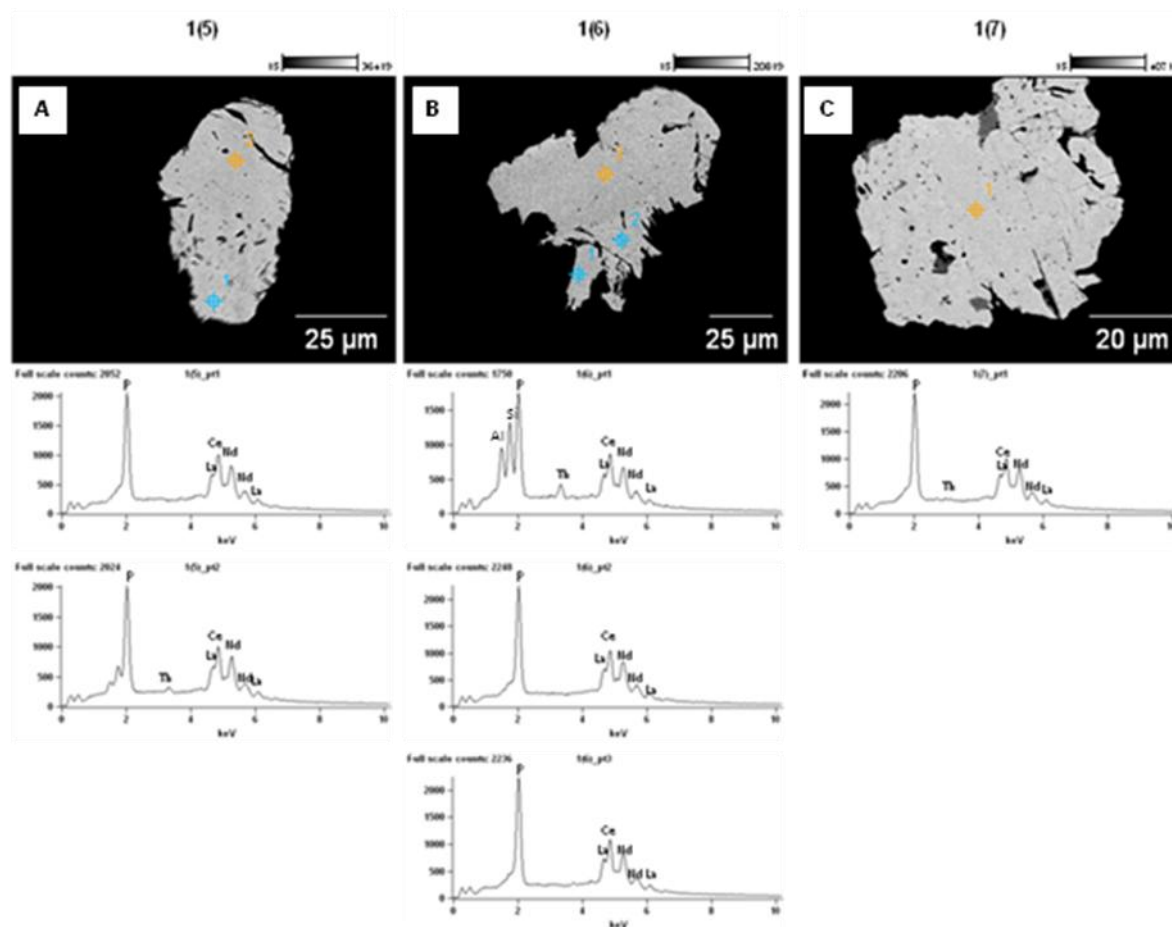
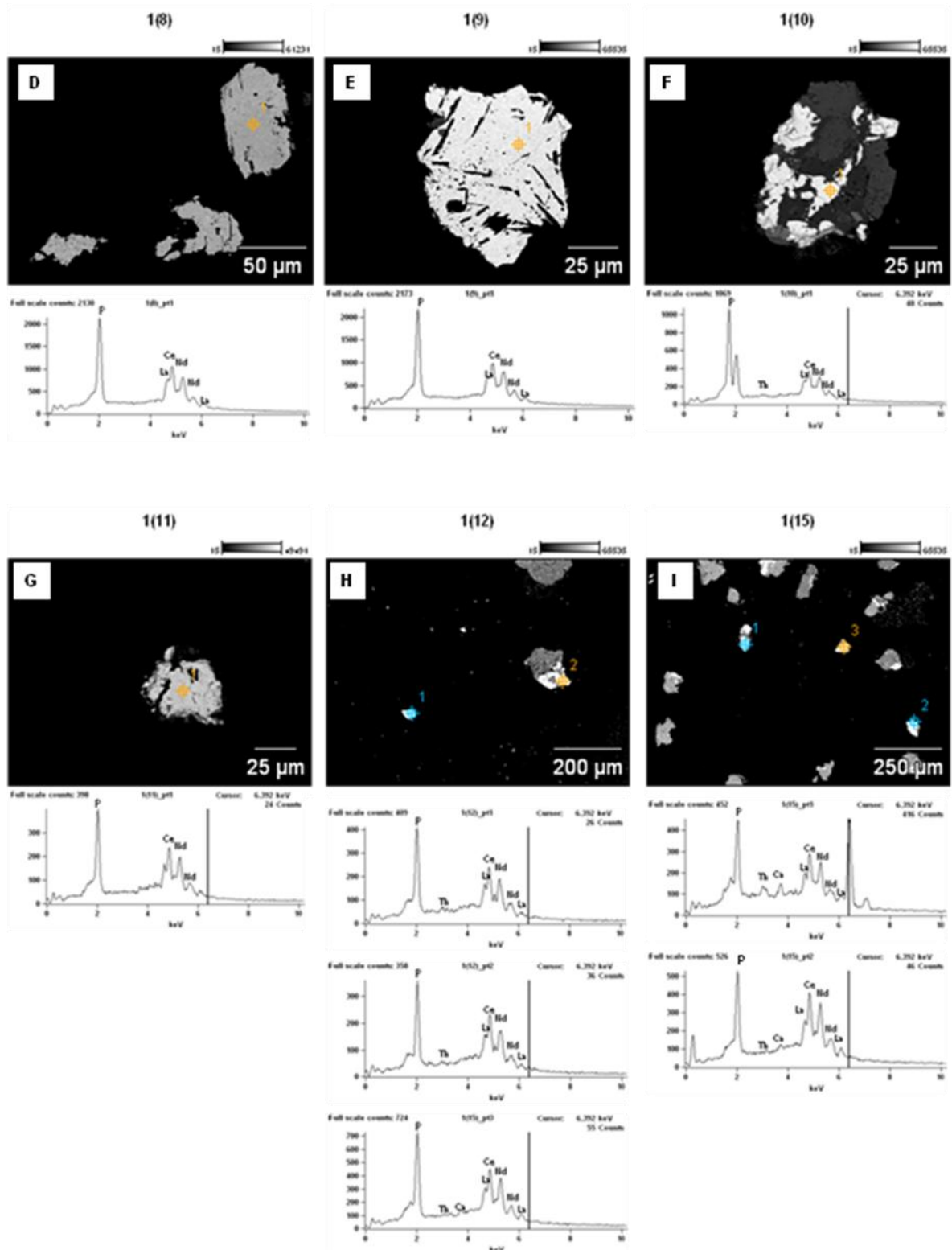


Figura 31 - Grãos de monazita montados em *mount* (BB174,5). Grãos translúcidos com coloração alaranjada, por vezes intercrescidas com óxido. Possuem uma forma levemente oblata.





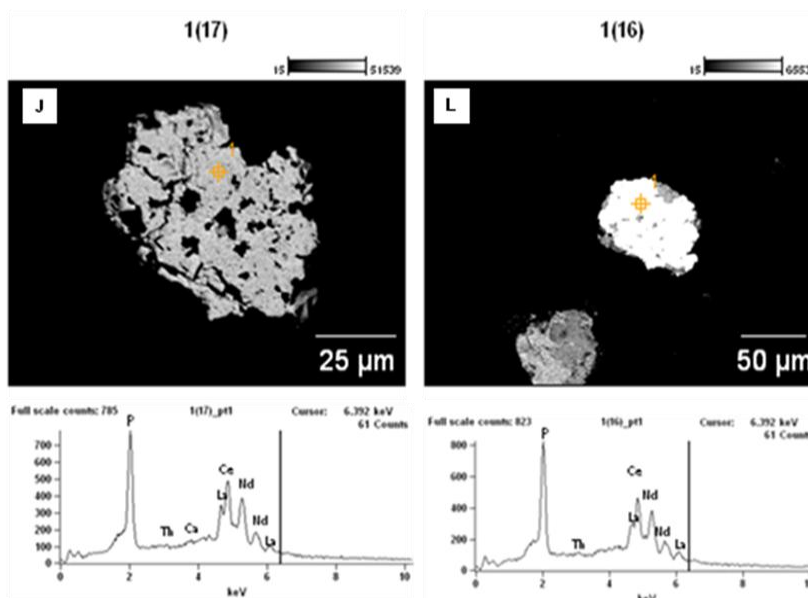


Figura 32 - Imagens BSE de monazitas em *mount*. Abaixo das imagens estão os espectros de EDS com os picos característicos para monazitas. A, C-Grãos com forma levemente oblata. D e F- Agregados de grãos de monazita. C e E-Os grãos geralmente aparecem afetados por fraturas, B e F-Grão completamente anédrico. H e I – Grãos de monazita (brancos) envolvidos por outro mineral.

### 4.3 Dados Isotópicos

Sendo esse um trabalho de desenvolvimento metodológico, foram efetuadas análises para determinação de dados isotópicos das amostras e do padrão 44069. No anexo II encontra-se a tabela de redução dos dados.

#### 4.3.1 Resultado do padrão

Foram feitas 30 leituras do padrão, das quais algumas apresentaram uma boa concordância, porém com valores não condizentes para o mesmo; outras, não apresentaram coerência geocronológica, com idades muito a cima e muito abaixo do esperado. Desta forma, foram usadas apenas 9 análises para o cálculo da idade.

O padrão 44069 teve o comportamento dentro do esperado com uma concentração média de 4600ppm de U e 25000ppm de Th, entretanto estas concentrações foram muito variáveis, entre 1400 ppm e 7900 ppm de U, 110 ppm e 34000 ppm de Th. A razão Th/U também sofreu pequenas oscilações.

As idades U-Pb obtidas são discordantes, assim, foi determinada apenas a idade  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  média ponderada com base nessas análises. Na figura 33, estão representadas 9 análises, em barras vermelhas, que foram utilizadas para o cálculo da idade. O tamanho da barra significa o erro analítico, quanto maior o comprimento da barra, maior ele foi. Destacado em um retângulo vermelho está o erro analítico médio das análises, que foi de 7,1%. A linha inserida dentro deste erro representa a idade média ponderada obtida para o padrão Mz44069 que foi de  $454\pm 32$  Ma. Em um retângulo azul está delimitada idade ID-TIMS de  $429\pm 2$  Ma descrita para a monazita padrão (Aleinikoff et al., 2006).

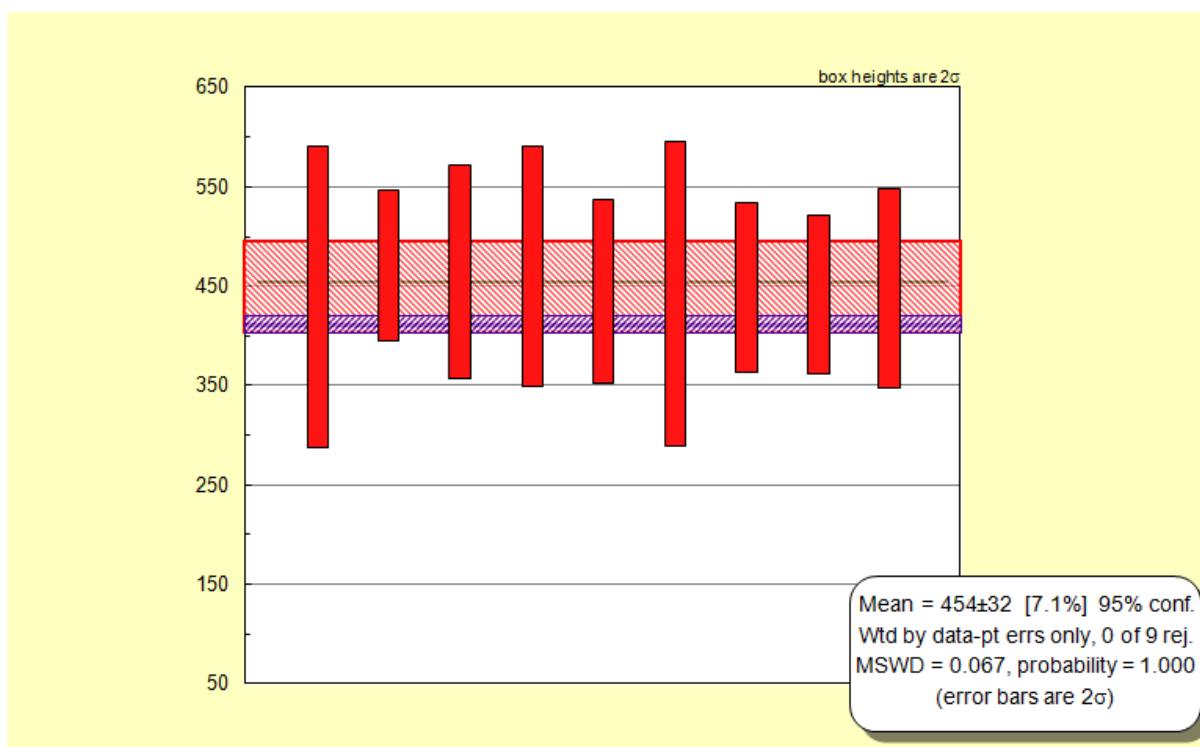


Figura 33 – Média das idades  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  (barras vermelhas) do padrão 44069 utilizado neste trabalho. Retângulo vermelho representa o erro analítico médio das análises e a linha inserida nele representa a idade média ponderada. O retângulo azul delimita a idade ID-TIMS do padrão segundo Aleinikoff et al. (2006).

#### 4.3.2 Resultados das Amostras

As análises U-Th-Pb em monazitas foram feitas em duas amostras do pertita granito hidrotermalizado: BB174,5 e BB106,6. Na amostra BB174,5 foram feitas 20

análises. Destas, 10 análises foram descartadas por apresentarem erro analítico elevado, restando apenas 10 análises para o cálculo da idade. Na amostra BB106,6 foram feitas 29 análises e todas apresentaram algum problema: valores incoerentes, idades sem concordância e o próprio sinal em algumas análises não era captado pelo equipamento. Dessa forma, o cálculo para a idade da monazita hidrotermal do PG foi baseado nas análises da primeira amostra.

A partir das razões isotópicas obtidas no LA-MC-ICPMS, foi possível identificar uma baixa concentração de elementos pais nas monazitas estudadas. Na amostra BB174,5 as concentrações de U e de Th variam, respectivamente, entre 190 e 400 ppm e 660 e 2000 ppm, com razões Th/U elevadas, como verificado usualmente em monazitas, que variam entre 4 a 7 vezes. Nas monazitas da amostra BB106,6, apesar de não ter sido possível obter um resultado, foram verificadas concentrações extremamente baixas de elementos-pais, 10 ppm a 250 ppm de U e 30 ppm a 70 ppm de Th.

A idade  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  calculada para as monazitas da amostra BB174,5 foi de  $591 \pm 29$  Ma. Os resultados fornecem um intervalo de tempo bastante amplo com uma variação entre 562 Ma e 620 Ma.

Na figura 34 estão representadas em forma de gráfico de barras as 10 análises utilizadas para o cálculo da idade, com os seus respectivos erros. Cada barra vermelha representa uma análise. O tamanho da barra significa o erro analítico, quanto maior o comprimento dela, maior erro analítico ela tem. Destacado em laranja está o erro analítico total das análises, que foi de 4.8%. A linha inserida dentro do erro representa a idade média ponderada obtida.

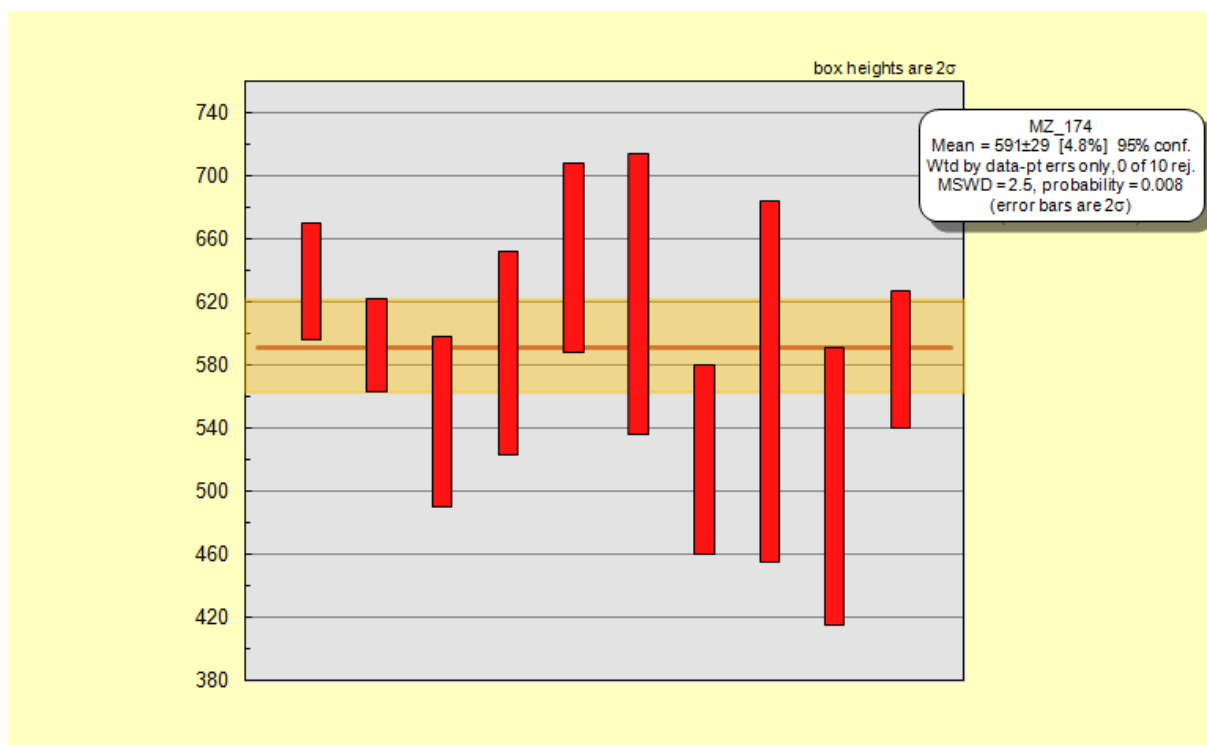


Figura 34 - Média das idades  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  (barras vermelhas) das monazitas da amostra BB174,5. O retângulo laranja representa o erro analítico médio das análises e a linha inserida nele representa a idade média ponderada.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

- 1) A investigação petrográfica e de MEV permitiram evidenciar a natureza hidrotermal da monazita, tanto pela presença de cristais em uma paragênese hidrotermal, como pela sua composição química. A ocorrência da monazita, restrita ao pertita granito com evidências de hidrotermalismo, no interior de anfibólios com alto grau de alteração e, por vezes em venulações com mica branca, não sendo observada no PG em outra situação textural além dessas, é uma forte evidência de sua natureza exclusivamente hidrotermal.
- 2) Com base nos dados de EDS foi verificado que essas monazitas apresentam teores baixos de U-Th. Por LA-MC-ICPMS estes baixos teores foram confirmados, eles variam entre 190 - 400 ppm de U e 660 - 2000 ppm Th. A baixa concentração de elementos-pais, verificada nas monazitas do PG, são observadas em monazitas hidrotermais em diversos outros estudos (Schandl & Gorton, 2004; Kempe et al., 2008; Poitrasson et al., 2000).
- 3) A investigação U-Th-Pb em grãos de monazita do PG hidrotermalizado produziu idade apenas para uma das amostras (BB174,5), permitindo a determinação apenas da idade média ponderada  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  de  $591 \pm 29$  Ma. Apesar disso, esse valor confirma a idade do evento hidrotermal (ca. 580 Ma) determinado



anteriormente por outros métodos (Bongiolo, 2002; Mexias, 2000). O erro analítico relativamente elevado não confere uma boa resolução para esse dado. Isso provavelmente deve-se tanto a fatores intrínsecos à natureza do material analisado, quanto das próprias condições de análise.

- 4) Com relação ao material analisado vários fatores devem ser considerados. A preparação das amostras foi bastante trabalhosa e pode ter influenciado nas análises ruins. Uma das possibilidades para o melhoramento é repensar a forma de preparação das amostras. Outra característica negativa das monazitas investigadas é a sua textura (geralmente irregulares, formada por agregados de grãos) e seus pequenos tamanhos (geralmente inferiores a 70 $\mu$ m). Entretanto, o principal fator negativo é a baixa concentração de elementos-pais, o que, por decorrência, sugere baixa concentração de elementos-filhos.
- 5) Por outro lado, a própria análise U-Th-Pb pelo LA-MC-ICPMS deve ser um fator a ser considerado na interpretação dos resultados obtidos. Para isso, é importante notar que mesmo os resultados obtidos para o padrão de monazita 44069, não só produziram uma idade  $^{207}\text{Pb}/^{205}\text{Pb}$  com erro analítico relativamente elevado (454 $\pm$ 32 Ma), mas também mostraram-se bastante discordantes, impossibilitando a determinação de uma idade U-Pb concordante. Isso sugere que as configurações analíticas para datação de monazitas em geral com o LA-MC-ICPMS no LGI devem ser melhor refinadas. Talvez uma forma de melhorar as análises seja adotar uma configuração de coletores e método analítico do equipamento especial para monazitas. Outras condições importantes a serem revistas na análise das monazitas dizem respeito à variação de energia e variação do tamanho do *spot* do laser. Durante as análises, verificou-se que com ablação de mais baixa energia, a concordância foi melhor, contudo as idades obtidas são muito fora do esperado. Com mais alta energia as idades ficaram melhores.

- 6) A grande diferença de composição entre padrão e amostra pode ser um fator de grande influência. Uma monazita hidrotermal pobre em Th e, principalmente em U necessita de condições analíticas diferentes das condições de um padrão rico em Th e em U, como o caso do padrão 44069.
- 7) Os resultados obtidos são um passo positivo no desenvolvimento da metodologia de datação U-Th-Pb de monazitas do LGI.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALENIKOFF, J.N., SCHENCH, W.S., PLANK, M.O., SROGI, L., FANNING, M.C., KAMO, S.L., BOSBYSHHELL, H., 2006. Deciphering igneous and metamorphic events in high-grade rocks of the Wilmington Complex, Delaware: morphology, cathodoluminescence and backscattered electron zoning, and SHRIMP U–Pb geochronology of zircon and monazite. *Geological Society of America Bulletin* 118 (1/2), 39–64. ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. 1984. O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgar Blucher Ltda., 378p.
- BONGIOLO, E.M. 2002. Mineralização de ouro da região de Lavras do Sul/RS e alteração associada. Porto Alegre. 131p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BONGIOLO, E. M., MEXIAS, A. S., SANTOS, J. O. S., HARTMANN, L. A., CONCEIÇÃO, R. V., GOMES, M. E. B., FORMOSO, M. L. L. 2003. Geocronologia do hidrotermalismo versus magmatismo no Distrito Aurífero de Lavras do Sul. In: SBG, Encontro Estratigrafia do Rio Grande do Sul: Escudo e Bacias, 1. Anais..., p. 83-88.
- BONGIOLO, E. M.; PATRIER-MAS, P.; MEXIAS, A. S.; BEAUFORT, D.; FORMOSO, M. L. L. 2008. Spatial and temporal evolution of hydrothermal alteration at Lavras do Sul, Brazil: Evidence from dioctahedral Clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, 56(2): 222-243.
- CARVALHO, P.F. 1932. Reconhecimento geológico do Rio Grande do Sul. *Inst. Geol. Min. Brás.*, Rio de Janeiro, Boletim 66:1-72.
- CHEMALE JR., F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ, M.; De ROS, L. F. (eds.). *Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS. P. 03-44.
- GASTAL, M. C. P. & LAFON, J. M., 1998. Gênese e evolução dos granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção oeste do Escudo Sul-riograndense: geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. *Rev. Bras. Geoc.* 28(1), 11-28.
- GASTAL, M. C. P., LAFON, J.M., HARTMANN, L., KOESTER, E. 2005. Sm-Nd isotopic investigation of Neoproterozoic and Cretaceous igneous rocks from southern Brazil: a study of magmatic processes. *Lithos*, 82:345-377.

- GASTAL, M. C. P.; LAFON, J. M.; FERREIRA, F. J. F.; MAGRO, J. F. U.; REMUS, M. V. D.; SOMMER, C. A. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte I: geologia, geofísica e geocronologia (207Pb/206Pb e 206Pb/238U). *Revista Brasileira de Geociências*, 36(1): 109-124, 2006.
- GONI, J. C. ~ 1961 - O Rapakivi Lavras, Jazidas Metalíferas associadas, Rio Grande do Sul, Brasil. *Bol. Esc. Geol. da UFRGS*, 7,91 p., Porto Alegre.
- JOST, H. & HARTMANN, L.A. 1984. Província Mantiqueira – Setor Meridional. In: ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. (coords.). *OPré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blücher. p. 345-368.
- KAUL, P. F. T.; ZIR FILHO, J. A. 1974. Mineralizações Auríferas de Lavras do Sul: tipos, controle tectônico, aspectos genéticos e guias para a localização de novos corpos mineralizados. In.: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 27, Porto Alegre, Anais... Porto Alegre, SBG.
- KEMPE U, LEHMANN B, WOLF D, RODIONOV N, BOMBACH K, SCHWENGFELDER U AND DIETRICH A. 2008. U-Pb SHRIMP geochronology of Th-poor, hydrothermal monazite: an example from the Llallagua tin-porphyry deposit, Bolivia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72(17):4352–4366.
- LEITE, J. A.D. 1995. Datação SHRIMP U/Pb em Zircões e o Exemplo de Dois Corpos Graníticos Contrastantes no Escudo Sul-Riograndense. In: *SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 6/ ENCONTRO DO CONE SUL, 1. 1995. Anais... Porto Alegre. SBG. p. 5-12.
- LEITE, J. A. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J. & CHEMALE JR., F. 1998. SHRIMP U/Pb Zircon Geochronology of Neoproterozoic Juvenile and Crustal-reworked Terranes in Southernmost Brazil. *International Geological Review*, 40:688-705.
- LIMA, E.F. DE 1995. *Petrologia das rochas vulcânicas e hipoabissais da Associação Shoshonítica de Lavras do Sul, RS*. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 338p.
- MEXIAS, A.S. 1990. O sistema hidrotermal fóssil de Volta Grande - Lavras do Sul/RS. Dissertação. (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 182 f.
- MEXIAS, A. S. 2000. Alteração Hidrotermal e Mineralização de Ouro Associada no Distrito Aurífero de Lavras do Sul/RS – A área do Bloco Butiá. Porto Alegre. 360 f. Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MEXIAS, A. S.; BONGIOLO, E. M.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L.; FRANTZ, J. C. 2007. Alterações hidrotermais e Mineralizações nas Rochas da Associação Plutono-Vulcano-Sedimentar da Região de Lavras do Sul-RS. In Ianuzzi, R.; Frantz, J. C. (Eds). *50 anos de geologia: Instituto de Geociências. Contribuições*. Porto Alegre. Comunicação e Identidade. P. 143-159.
- MINIOLI, B. & KAWASHITA, K. 1971. Contribuição à Estratigrafia do Eo-paleozóico do "Escudo Rio-Grandense" In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 25., 1971, São Paulo. Anais... São Paulo, SBG. p.193-198.
- NARDI, L. V. S. 1984. *Geochemistry and Petrology of the Lavras Granite Complex, RS, Brazil*. Londers. Tese de Doutorado em Geociências, Department of Geology, University of London, 268p.

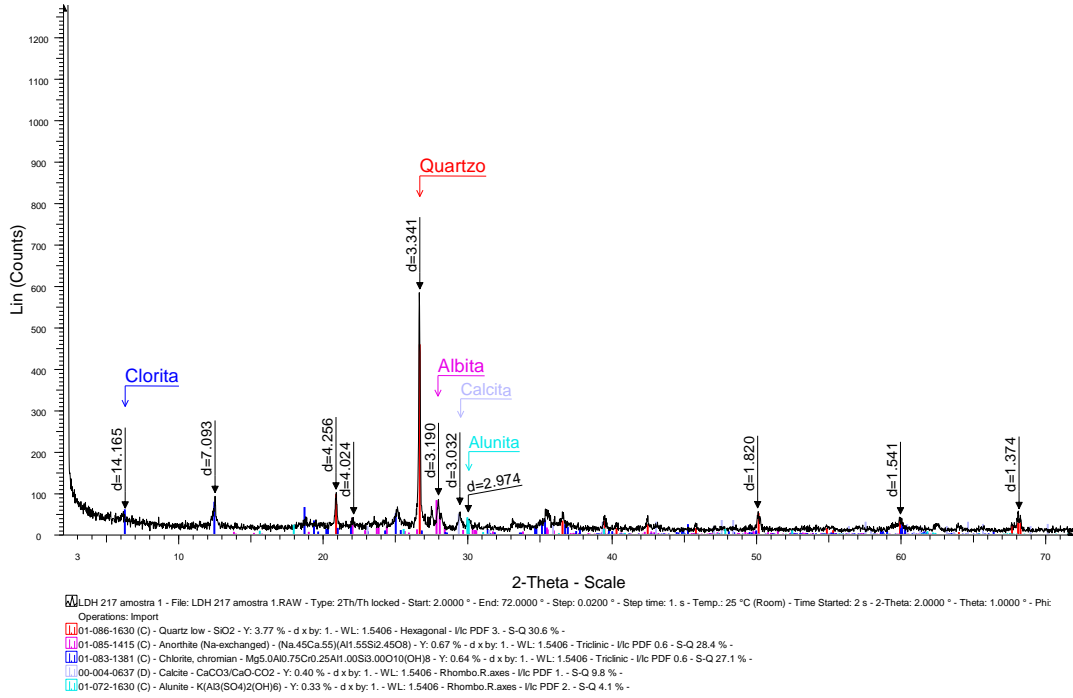
- NARDI L.V.S. and BONIN B. 1991. Post-orogenic and non-orogenic alkaline granite associations: the Saibro Intrusive Suite, Southern Brasil - A case study. *Chem. Geol.*, 92:197-211.
- NARDI L. V. S & LIMA E. F. 1985. A Associação Shoshonítica de lavras do Sul, RS. *Ver. Bras. Geol.*, 15(2):139-146.
- NARDI L.V.S. & LIMA E.F. 1988. Hidrotermalismo no Complexo Granítico Lavras e vulcânicas associadas, RS. *Rev. Bras. Geoc.*, 18:369-375.
- NARDI, L. V. S & LIMA, E. F. 2000. O magmatismo shoshonítico e Alcalino da Bacia do Camaquã – RS. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (Eds). *Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Editora Gráfica da UFRGS. P 119-131.
- PAIM, P. S. G, CHEMALE JR. F, LOPES, R. C. 1995. Aloestratigrafia, Sistemas Depositionais e Evolução Paleogeográfica da Bacia do Camaqua - Vendiano Superior/Ordoviciano Inferior do RS. In: SBG, Simposio Sul-Brasileiro de Geologia, Sao Paulo, Anais 4:39-50.
- POITRASSON, F., CHENERY, S., SHEPHERD, T.J., 2000. Electron microprobe and LA-ICP-MS study of monazite hydrothermal alteration: implications for U–Th–Pb geochronology and nuclear ceramics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (19), 3283–3297.
- REED, S. J. B. 1996. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press. Cambridge.
- REMUS, M. V. D.; MCNAUGHTON, N. J.; HARTMANN, L. A. & FLETCHER, I. R. 1997. Zircon SHRIMP U/Pb and Nd Isotope Data of Granitoids of the São Gabriel Block, Southern Brazil: Evidence for an Archean/Paleoproterozoic Basement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS 2, Salvador, Extended abstracts and Program, p.271-272.
- REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I. & FLETCHER, I. R. 2000. A Distal Magmatic-Hydrothermal Origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) Deposits, Southern Brazil. *Gondwana Research* 3(2), 155-174.
- REISCHEL, J.L. 1980. Mineralizações auríferas associadas ao Complexo Granítico de Lavras do Sul, RS. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 31, Anais, p. 1700-1712.
- RIBEIRO, M. 1983. Informes sobre a Formação Maricá. *Iheringia*, 9:1-84. (Série Geologia)
- RIBEIRO, M.; FANTINEL, L.M. 1978. Associações petrotectônicas do Escudo Sul-riograndense: I- tabulação e distribuição das associações petrotectônicas do Escudo do Rio Grande do Sul. *Iheringia*, 5:19-54. (Série Geológica).
- SCHANDL, E.S., AND GORTON, M.P., 2004, A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits: *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists*, v.99, p. 1027-1035.
- SOLIANI JR., E. 1986. Os Dados Geocronológicos do Escudo Sul-riograndense e Suas Implicações de Ordem Geotectônica. São Paulo. 425 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
- TEIXEIRA, E. & LEINZ, V. 1942. Ouro no Bloco do Butiá (Rio Grande do Sul). *Diretoria Nacional de Pesquisas Minerais, Rio de Janeiro. Boletim n.5, 181p.*



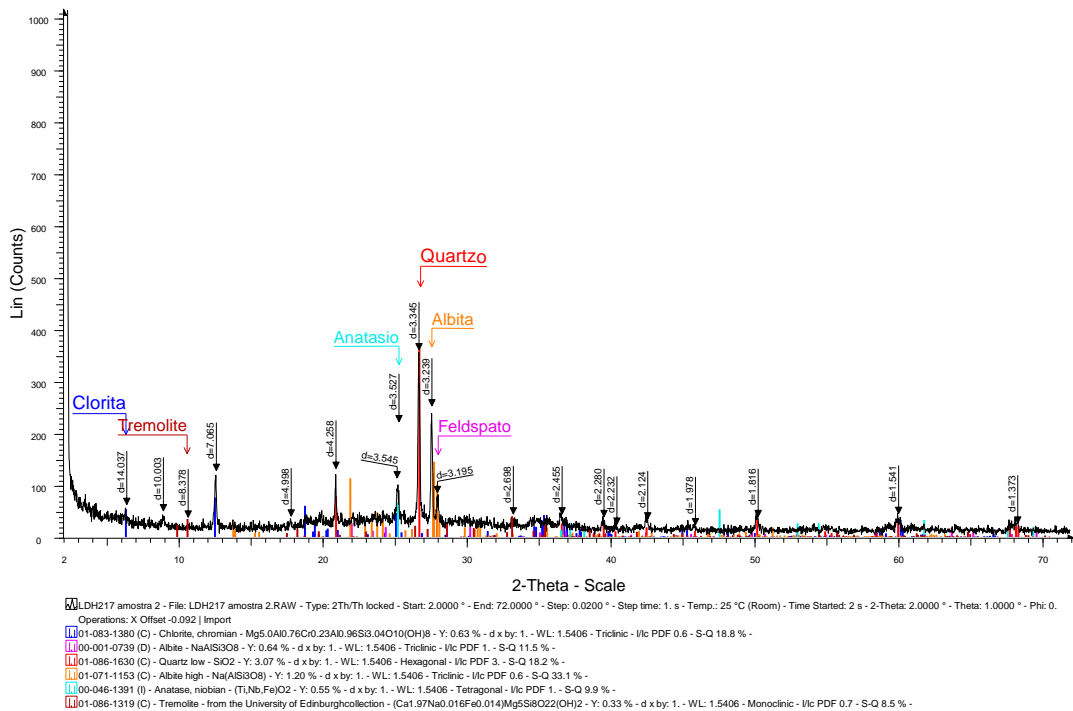
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Geociências  
Laboratório de Geologia Isotópica

# ANEXO I

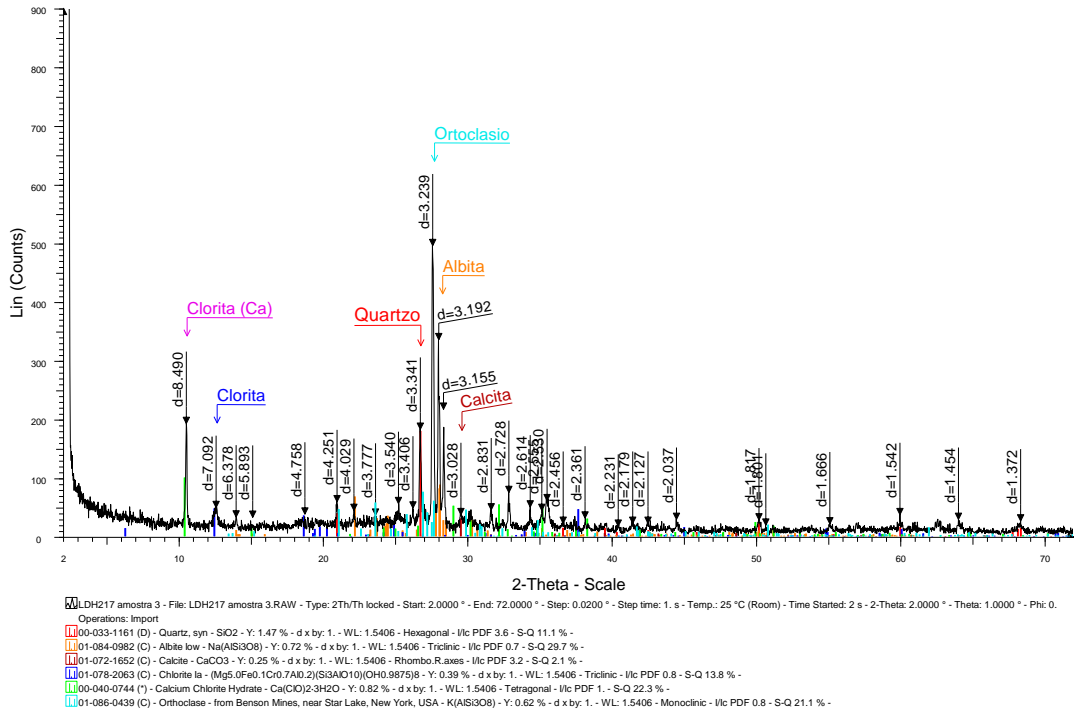
## BB7-1



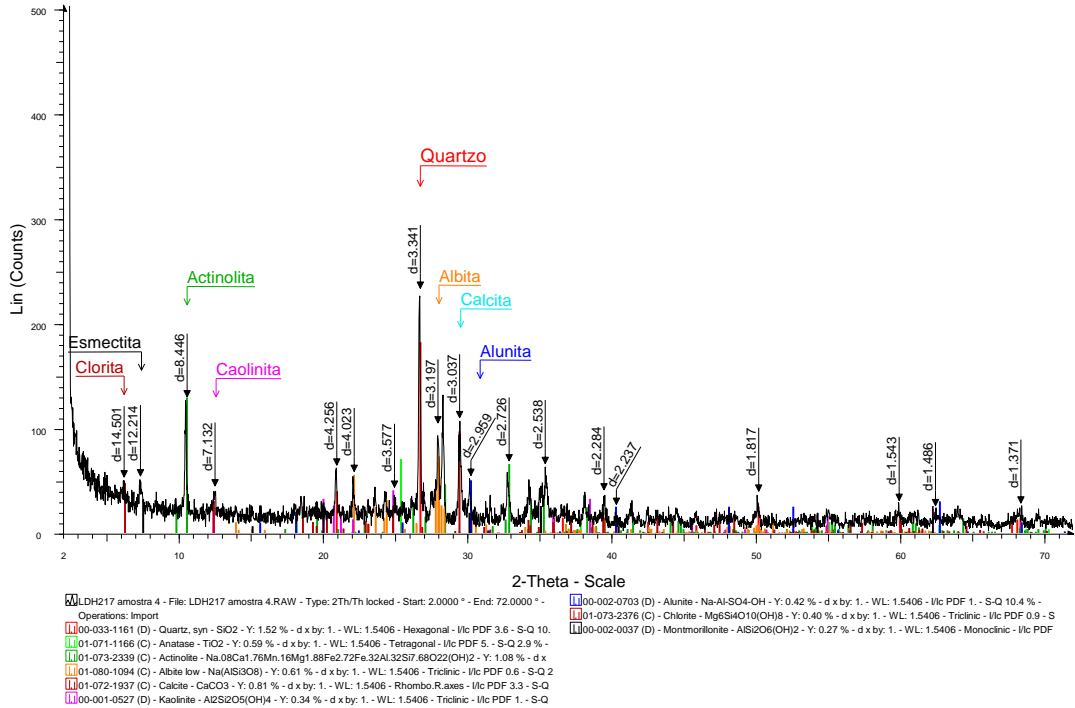
## BB7-2



### BB7-3

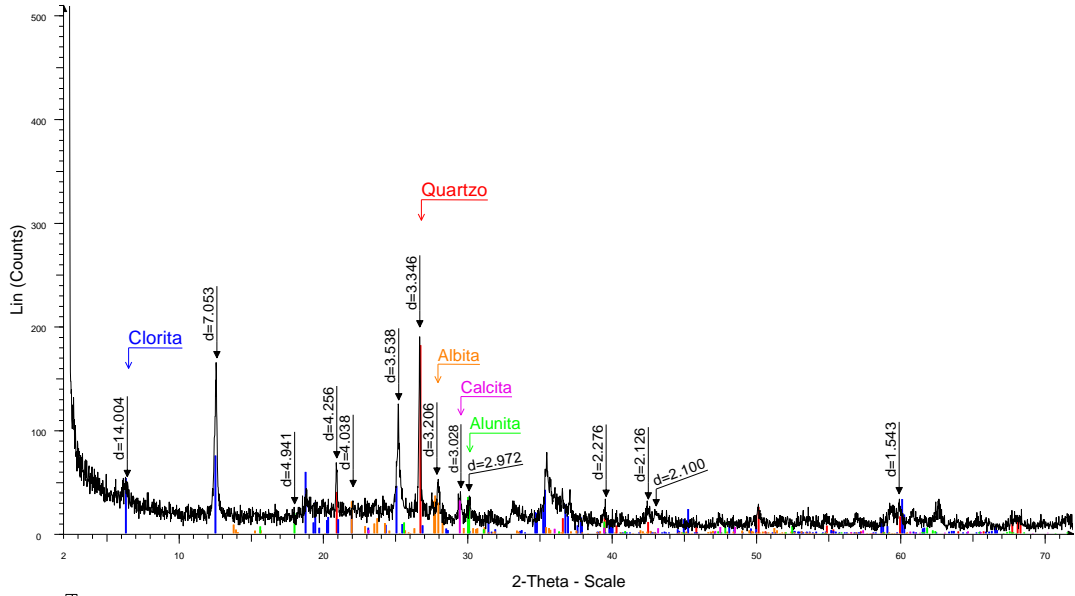


### BB7-4



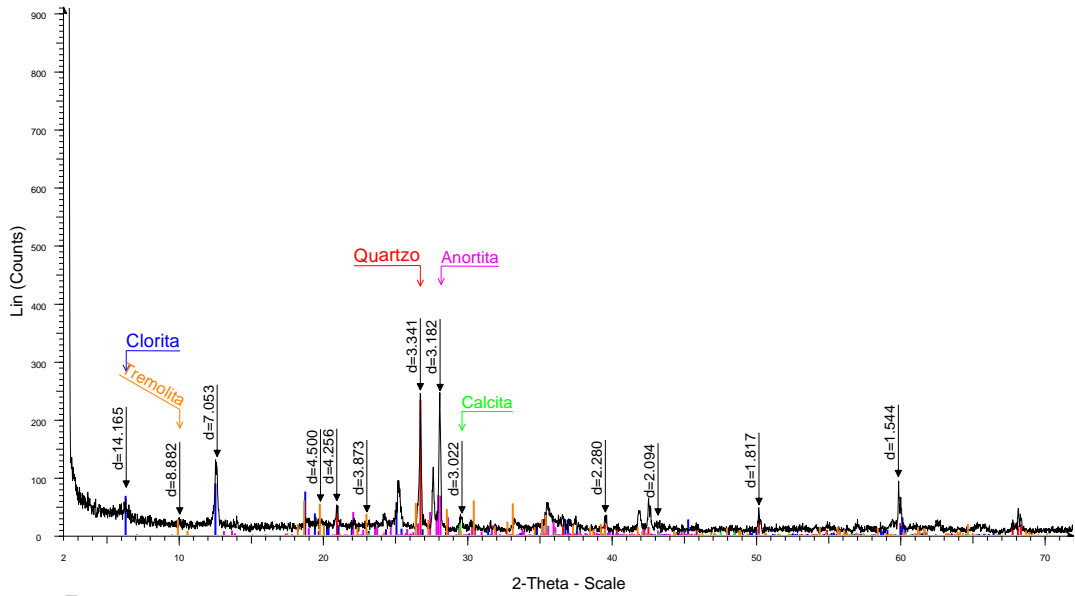


## BB7-5



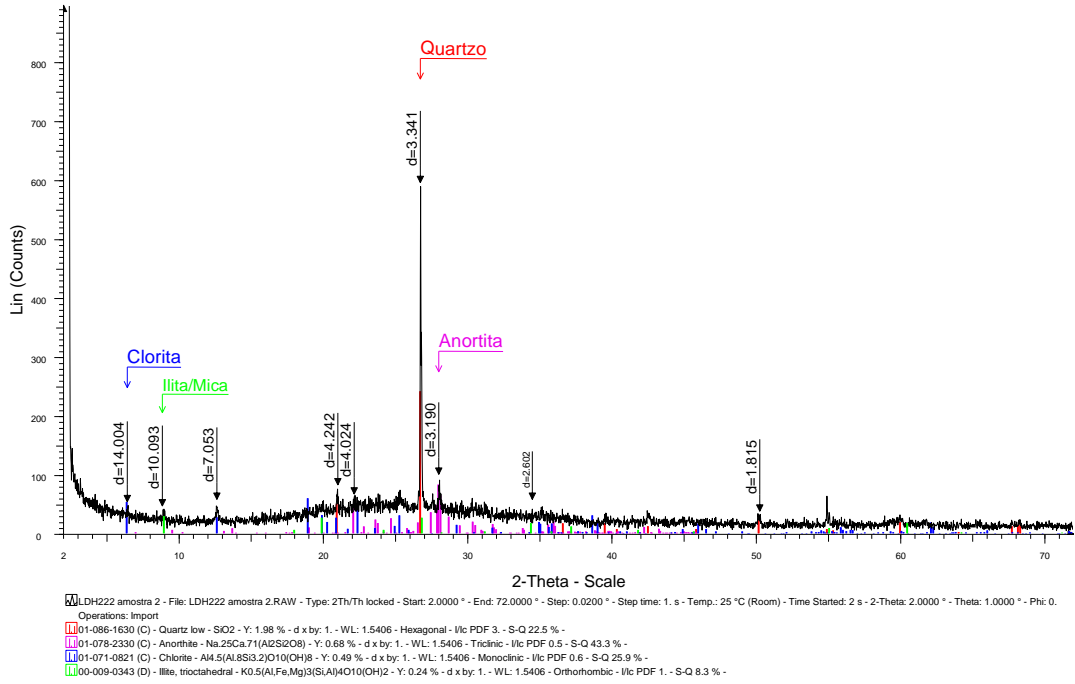
LDH217 amostra 5 - File: LDH217 amostra 5.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.0000 ° - End: 72.0000 ° - Step: 0.0200 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.0000 ° - Theta: 1.0000 ° - Phi: 0.  
 Operations: Import  
 00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 1.50 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - Ilc PDF 3.6 - S-Q 19.2 % -  
 01-083-1380 (C) - Chlorite, chromian - Mg5.0A0.76Cr0.23Al0.96Si3.04O10(OH)8 - Y: 0.62 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - Ilc PDF 0.6 - S-Q 47.6 % -  
 01-083-1608 (C) - Albita high - Na(AlSi3O8) - Y: 0.30 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - Ilc PDF 0.6 - S-Q 22.7 % -  
 01-072-1630 (C) - Alunita - K(Al)(SO4)2(OH)6 - Y: 0.29 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - Ilc PDF 2. - S-Q 6.8 % -  
 01-086-0174 (C) - Calcite - synthetic - Ca(CO3) - Y: 0.26 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - Ilc PDF 3.2 - S-Q 3.7 % -

## BB2-1

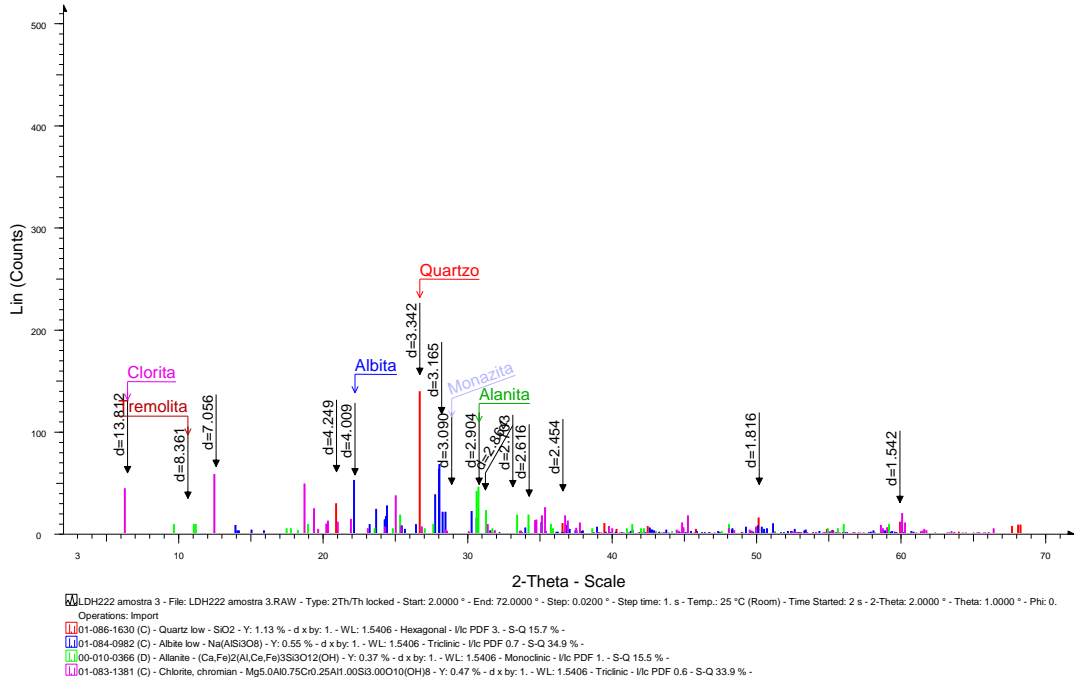


LDH222 amostra 1 - File: LDH222 amostra 1.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.0000 ° - End: 72.0000 ° - Step: 0.0200 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.0000 ° - Theta: 1.0000 ° - Phi: 0.  
 Operations: Import  
 00-033-1161 (D) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 1.88 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - Ilc PDF 3.6 - S-Q 12.9 % -  
 01-083-1381 (C) - Chlorite, chromian - Mg5.0A0.75Cr0.25Al1.00Si3.00O10(OH)8 - Y: 0.72 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - Ilc PDF 0.6 - S-Q 30.6 % -  
 01-073-1435 (C) - Anorthite - Ca(Al2Si2O8) - Y: 0.56 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - Ilc PDF 0.6 - S-Q 25.1 % -  
 01-086-0174 (C) - Calcite - synthetic - Ca(CO3) - Y: 0.25 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - Ilc PDF 3.2 - S-Q 1.9 % -  
 01-085-0877 (C) - Tremolite - Na.19K.06Ca.90Mg2.5Fe.01Al.24Si7.84O24 - Y: 0.48 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - Ilc PDF 0.4 - S-Q 29.6 % -

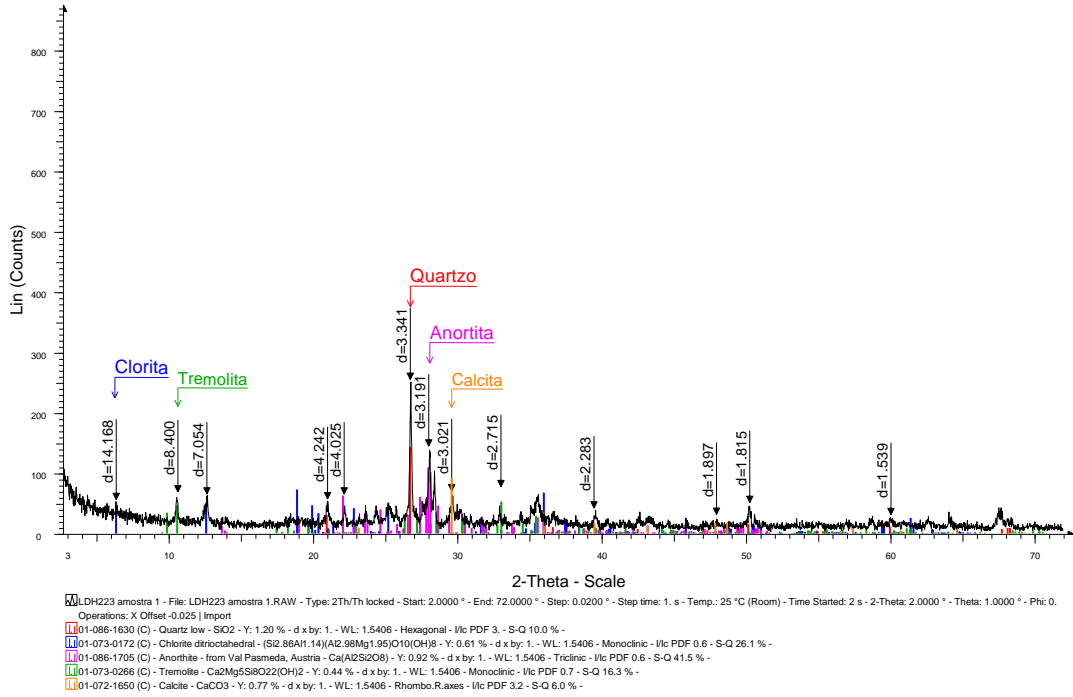
## BB2-2



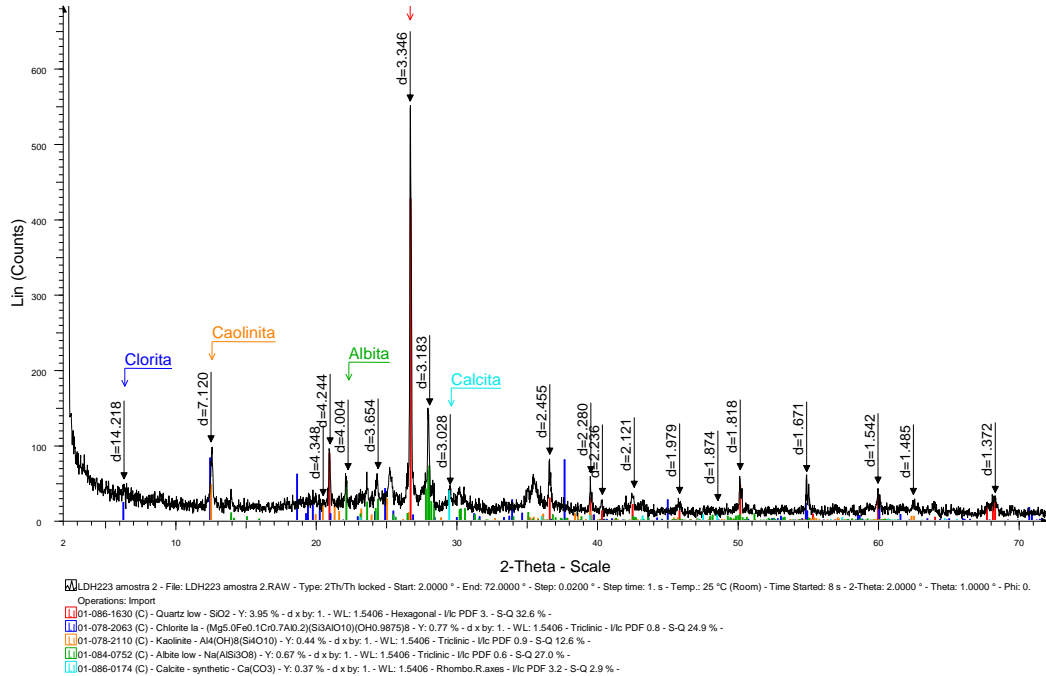
## BB2-3



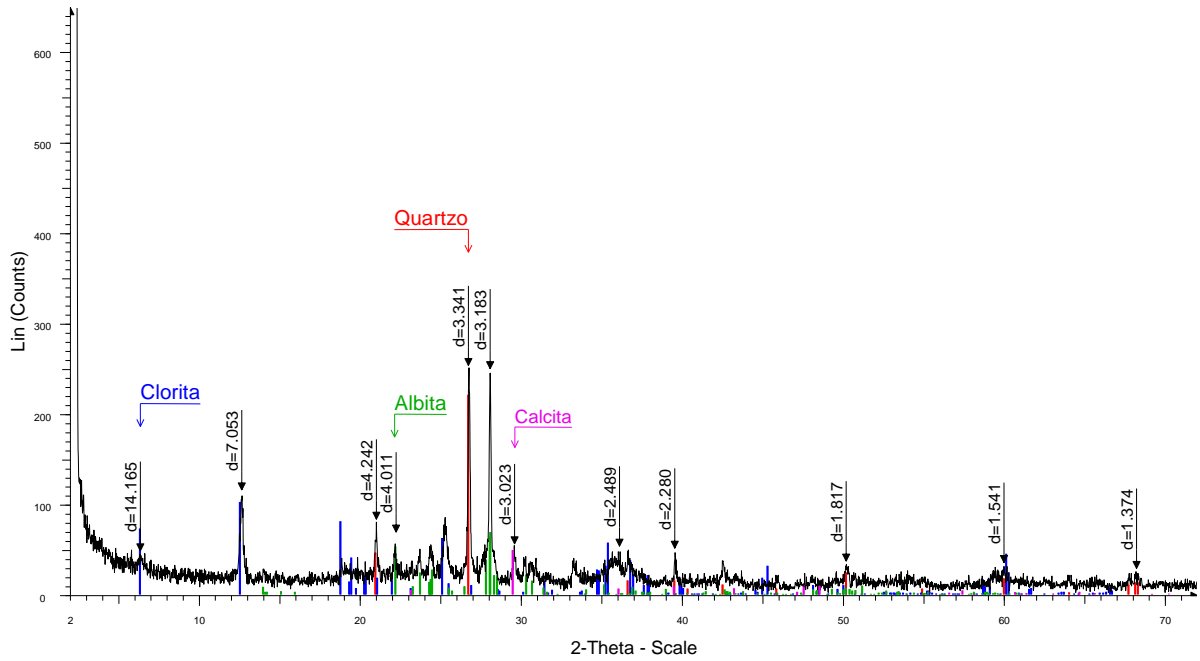
# BB3-1



# BB3-2



### BB3-3

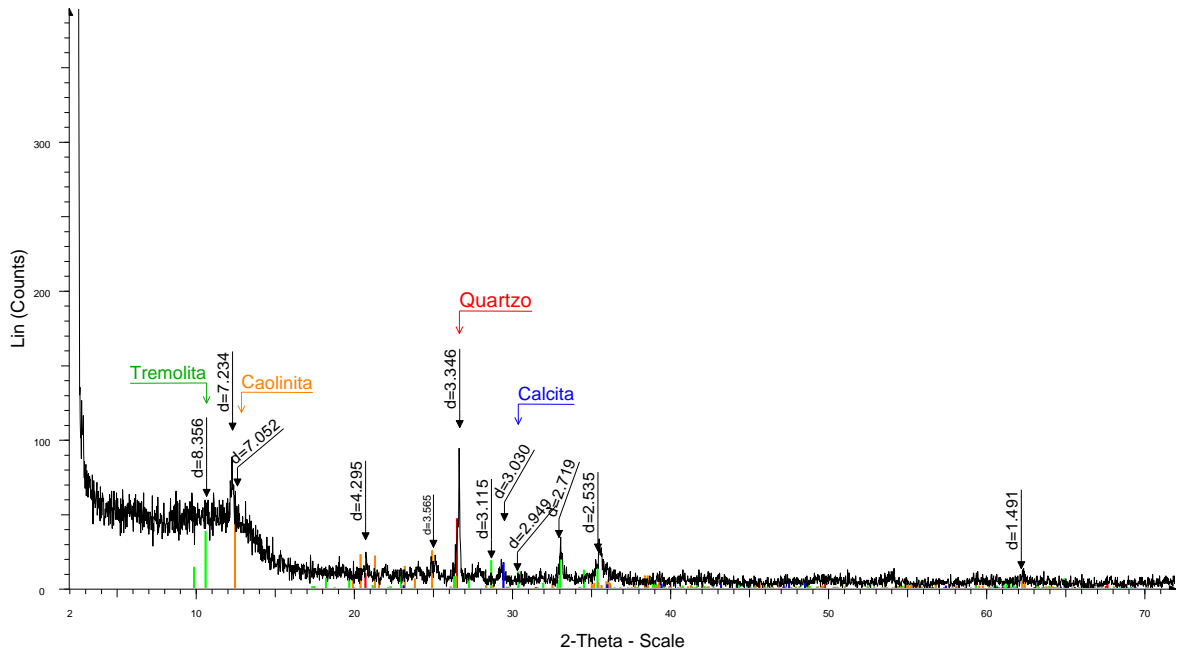


LDH223 amostra 3 - File: LDH223 amostra 3.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.0000 ° - End: 72.0000 ° - Step: 0.0200 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.0000 ° - Theta: 1.0000 ° - Phi: 0.

Operations: Import

- 01-086-1630 (C) - Quartz lw - SiO<sub>2</sub> - Y: 1.79 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - I/Ic PDF 3. - S-Q 20.1 % -
- 01-083-1380 (C) - Chlorite, chromian - Mg<sub>5</sub>OAl<sub>2</sub>7C<sub>2</sub>O<sub>23</sub>Al<sub>2</sub>96Si<sub>3</sub>O<sub>40</sub>(OH)<sub>8</sub> - Y: 0.83 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - I/Ic PDF 0.6 - S-Q 46.9 % -
- 01-084-0982 (C) - Albite low - Na(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) - Y: 0.56 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - I/Ic PDF 0.7 - S-Q 28.8 % -
- 01-083-1762 (C) - Calcite - Ca(CO<sub>3</sub>) - Y: 0.40 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - I/Ic PDF 3.3 - S-Q 4.2 % -

### BB3-4



LDH223 amostra 4 - File: LDH223 amostra 4.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.0000 ° - End: 72.0000 ° - Step: 0.0200 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 2 s - 2-Theta: 2.0000 ° - Theta: 1.0000 ° - Phi: 0.

Operations: X Offset 0.175 | X Offset 0.050 | Import

- 01-083-2187 (C) - Quartz alpha - SiO<sub>2</sub> - Y: 0.38 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - I/Ic PDF 3.1 - S-Q 13.5 % -
- 01-085-2157 (C) - Tremolite - (Na<sub>0.11</sub>K<sub>0.04</sub>)(Na<sub>0.04</sub>Ca<sub>1.67</sub>Mn<sub>0.03</sub>Mg<sub>3.65</sub>Fe<sub>1.40</sub>Al<sub>0.21</sub>)(Si<sub>7.38</sub>Al<sub>0.02</sub>) - Y: 0.31 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - I/Ic PDF 0.8 - S-Q 42.5 % -
- 01-078-1996 (C) - Kaolinite - Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub> - Y: 0.40 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Triclinic - I/Ic PDF 1.1 - S-Q 39.2 % -
- 01-086-0174 (C) - Calcite - synthetic - Ca(CO<sub>3</sub>) - Y: 0.14 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - I/Ic PDF 3.2 - S-Q 4.8 % -

## ANEXO II

Amostra	U(ppm)	Th(ppm)	Th/U	razão 7/6	1s(%)	razão 7/5	1s(%)	razão 6/8	1s(%)	Rho	idade 7/6	1s	idade 7/5	1s	idade 6/8	1s	Conc (%)
03_mz44069	5678	26529	4,67	0,05568	0,8	0,4562	1,1	0,05943	0,8	0,67	439,6	17,3	381,6	3,5	372,2	2,8	84,67
04_ma44069	1414	8457	5,98	0,05563	1,4	-0,7837	149,1	-0,10218	149,1	1,00	437,6	32,2	-1554,8	-5488,3	-694,8	-1094,2	-158,80
05_mz44069	3877	23124	5,97	0,05626	0,4	0,4447	0,7	0,05732	0,6	0,82	462,8	8,4	373,6	2,3	359,3	2,2	77,65
06_mz44069	4425	23160	5,23	0,05631	0,5	0,4467	0,9	0,05753	0,7	0,85	464,6	11,6	374,9	2,9	360,6	2,6	77,61
09_mz44069	4840	24129	4,99	0,05566	0,8	0,2785	21,0	0,03629	21,0	1,00	438,7	18,6	249,4	46,5	229,8	47,5	52,38
10_mz44069	7238	32662	4,51	0,05436	1,1	0,4242	2,6	0,05659	2,4	0,91	386,0	24,1	359,0	7,9	354,9	8,2	91,94
11_mz44069	2975	14320	4,81	0,05490	0,9	-0,5970	40,7	-0,07887	40,7	1,00	408,0	20,5	-922,7	-612,5	-529,6	-224,7	-129,78
12_mz44069	7908	29107	3,68	0,05638	0,6	0,4464	1,0	0,05743	0,8	0,88	467,4	12,3	374,8	3,2	360,0	2,9	77,01
15_mz44069	5216	28254	5,42	0,05569	0,5	0,4535	0,8	0,05907	0,7	0,78	440,1	10,1	379,8	2,5	369,9	2,3	84,06
16_mz44069	5946	32145	5,41	0,05562	0,8	0,3791	7,8	0,04944	7,8	1,00	437,4	17,4	326,4	21,9	311,1	23,7	71,12
17_mz44069	3420	23579	6,90	0,05517	0,7	-0,2607	66,7	-0,03427	66,7	1,00	419,2	14,6	-306,7	-238,7	-224,8	-152,5	-53,62
18_mz44069	4709	26476	5,62	0,05450	1,9	0,2926	14,3	0,03893	14,2	1,00	391,9	43,4	260,6	32,8	246,2	34,2	62,82
21_mz44069	6154	34125	5,55	0,05535	0,8	0,1266	69,5	0,01659	69,5	1,00	426,5	18,2	121,1	79,3	106,1	73,1	24,87
22_mz44069	6639	34871	5,25	0,06240	1,9	0,4866	2,0	0,05656	0,7	0,33	687,7	40,6	402,6	6,8	354,7	2,5	51,58
23_mz44069	1323	113	0,09	0,07288	0,4	1,5588	0,7	0,15511	0,6	0,77	1010,7	8,0	954,0	4,3	929,6	4,9	91,97
24_mz44069	2518	13611	5,41	0,05516	2,1	-0,9303	27,8	-0,12232	27,7	1,00	418,7	46,2	-2704,5	-3764,8	-841,1	-248,9	-200,90
				0,00000	0,0	0,0000	0,0	0,00000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	#DIV/0!
				0,00000	0,0	0,0000	0,0	0,00000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	#DIV/0!
35_mz174	164	795	4,86	0,06084	0,9	-2,8475	25,0	-0,33943	25,0	1,00	633,7	18,5	#VALOR!	391,2	-2673,1	-827,5	-421,85
36_mz174	197	1058	5,38	0,05971	0,7	-1,0007	40,8	-0,12155	40,7	1,00	593,1	14,7	#VALOR!	591821,8	-835,4	-363,5	-140,86
37_mz174	285	1729	6,08	0,05839	1,2	-1,0699	44,3	-0,13290	44,3	1,00	544,4	27,0	#VALOR!	6883,1	-919,3	-437,6	-168,86
38_mz174	165	883	5,36	0,05958	1,5	-3,3716	39,4		39,4	1,00	588,3	32,3	#VALOR!	569,3	-3406,2	-1768,8	-579,02
42_mz174	144	634	4,40	0,06126	1,4	-9,2061	40,8	-1,08998	40,8	1,00	648,3	30,0	#VALOR!	464,7	#VALOR!	31839,6	#VALOR!
43_mz174	162	1015	6,25	0,06061	2,1	-2,5241	36,3	-0,30202	36,2	1,00	625,5	44,7	#VALOR!	610,4	-2317,9	-1010,9	-370,57
44_mz174	149	931	6,25	0,05775	1,4	-6,8454	26,9	-0,85966	26,9	1,00	520,4	30,0	#VALOR!	320,4	-12658,6	-10627,0	-2432,42
45_mz174	452	2294	5,08	0,05908	2,6	0,7485	4,1	0,09189	3,2	0,92	570,0	57,5	567,4	18,0	566,7	17,2	99,42
48_mz174	270	1521	5,64	0,05733	2,0	0,5408	17,5	0,06842	17,4	0,99	504,1	44,0	438,9	62,4	426,6	71,8	84,63
49_mz174	475	1750	3,68	0,06319	0,4	0,8480	1,0	0,09733	0,9	0,90	714,7	8,4	623,6	4,4	598,7	5,0	83,78
50_mz174	233	1600	6,86	0,05947	1,0	-0,1896	133,1	-0,02312	133,1	1,00	584,2	22,1	-213,4	-316,1	-150,8	-203,0	-25,81
51_mz174	99	468	4,71	0,13774	38,7	3,0566	135,0	0,16094	129,4	0,99	2199,0	671,5	1421,9	1032,9	962,0	1156,0	43,75
56_mz174	4	129	34,34	0,34471	15,5	13,2460	490,1	0,27867	489,8	1,00	3683,8	236,1	2697,3	4626,8	1584,7	6881,8	43,02
57_mz174	0	1	16,14	-0,09203	279,1	-55,7575	293,3	4,39417	90,0	0,31	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	3032,2	10864,3	4727,7	#NUM!
58_mz174	0	-1	-1,32	0,21855	66,2	-194,2081	159,8	-6,44494	145,5	0,91	2970,0	1066,2	#VALOR!	1631,3	#VALOR!	11101,5	#VALOR!
61_mz174	0	0	-0,02	0,52928	61,3	223,4984	80,9	3,06258	52,8	0,86	4324,9	900,0	5497,2	818,0	9036,7	2565,1	208,95

Amostra	U(ppm)	Th(ppm)	Th/U	razão 7/6	2s(%)	razão 7/5	2s(%)	razão6/8	2s(%)	Rho	idade 7/6	1s(Ma)	idade 7/5	1s(Ma)	idade 6/8	1s(Ma)	Conc (%)
03_MZ44069	93	35	0.38	0.05568	0.8	0.4562	1.1	0.05942	0.8	0.67	439.6	17.3	381.6	3.5	372.1	2.8	84.66
04_MZ44069	259	76	0.29	0.05563	1.4	-0.7829	149.2	-0.10207	149.2	1.00	437.7	32.2	-1551.0	-5462.6	-694.0	-1093.0	-158.57
05_MZ44069	105	45	0.43	0.05647	0.4	0.4973	2.7	0.06387	2.7	0.99	470.9	8.0	409.9	9.1	399.1	10.3	84.75
06_MZ44069	148	32	0.21	0.05631	0.5	0.4466	0.9	0.05752	0.7	0.85	464.6	11.6	374.9	2.9	360.6	2.6	77.61
09_MZ44069				0.05570	0.8	0.2785	21.1	0.03627	21.1	1.00	440.3	18.7	249.5	46.6	229.7	47.5	52.47
10_MZ44069				0.05437	1.1	0.4244	2.6	0.05661	2.4	0.91	386.3	24.0	359.2	7.8	355.0	8.2	91.88
11_MZ44069				0.05724	0.7	1.8611	18.1	0.23580	18.1	1.00	501.0	15.0	1067.4	119.8	1364.8	223.0	272.43
12_MZ44069	7905	29111	3.68	0.05645	0.6	0.4473	1.0	0.05747	0.9	0.88	470.3	12.9	375.4	3.2	360.2	3.0	76.60
15_MZ44069	5217	28253	5.42	0.05580	0.5	0.4539	0.8	0.05899	0.7	0.78	444.6	10.3	380.0	2.6	369.5	2.4	83.11
16_MZ44069	5947	32149	5.41	0.05575	0.8	0.3795	7.8	0.04936	7.8	1.00	442.5	17.4	326.6	21.9	310.6	23.7	70.19
17_MZ44069	3419	23582	6.90	0.05773	0.6	1.3855	16.1	0.17405	16.0	1.00	519.6	13.4	882.8	94.7	1034.4	153.3	199.07
18_MZ44069	4709	26473	5.62	0.05464	2.0	0.2928	14.3	0.03886	14.1	1.00	397.6	44.1	260.8	32.8	245.8	34.1	61.82
21_MZ44069	6156	34130	5.54	0.05541	0.8	0.1264	69.6	0.01654	69.6	1.00	428.7	18.5	120.8	79.4	105.8	73.1	24.67
22_MZ44069	6639	34872	5.25	0.06239	1.9	0.4865	2.0	0.05655	0.7	0.33	687.7	40.5	402.5	6.8	354.6	2.5	51.57
23_MZ44069	1323	113	0.09	0.07249	0.4	1.7131	2.3	0.17139	2.3	0.98	999.8	8.3	1013.4	15.0	1019.7	21.8	101.99
24_MZ44069	2517	13617	5.41	0.05518	2.0	-0.9294	27.7	-0.12216	27.6	1.00	419.4	45.0	-2691.4	-3699.3	-839.9	-247.6	-200.27
27_MZ44069	3228	20912	6.48	0.05473	1.1	-0.8085	41.1	-0.10714	41.1	1.00	401.2	24.8	-1678.2	-1761.9	-730.5	-317.8	-182.06
28_MZ44069	5231	28990	5.54	0.05592	0.4	0.4304	0.8	0.05581	0.6	0.79	449.2	9.5	363.4	2.4	350.1	2.2	77.94
29_MZ44069	5089	30213	5.94	0.05573	0.4	0.5001	3.0	0.06508	2.9	0.99	441.7	9.0	411.8	10.1	406.4	11.6	92.02
30_MZ44069	6104	32252	5.28	0.05588	0.5	0.4548	1.0	0.05903	0.9	0.89	447.7	11.2	380.6	3.2	369.7	3.1	82.57
204_mz44069	18275	82643	4.52	0.05255	7.9	0.3677	56.6	0.05076	56.1	0.99	309.2	179.1	318.0	154.5	319.2	174.6	103.22
205_mz44069	34031	139579	4.10	0.05222	6.5	0.3615	45.9	0.05021	45.4	0.99	295.0	147.6	313.3	123.6	315.8	139.9	107.06
206_mz44069	3503	14425	4.12	0.06878	7.1	2.0574	37.9	0.21694	37.3	0.98	892.2	146.8	1134.8	259.3	1265.7	428.3	141.86
216_mz44069	8814	37312	4.23	0.05698	0.8	0.4713	1.4	0.06000	1.2	0.83	490.7	17.2	392.1	4.7	375.6	4.4	76.55
217_mz44069	8232	42837	5.20	0.05700	0.7	0.5115	1.3	0.06508	1.1	0.84	491.5	15.5	419.5	4.6	406.5	4.4	82.70
218_mz44069	5348	26706	5.02	0.05818	0.5	0.7177	3.5	0.08946	3.5	0.99	536.6	11.7	549.3	15.0	552.4	18.5	102.95
229_mz44069				0.06817	3.6	222.7058	24.3	23.69245	24.0	0.99	873.9	73.6	5493.6	245.7	20670.4	1487.4	2365.43
230_mz44069				0.06007	0.6	0.8274	1.9	0.09990	1.8	0.98	606.2	14.0	612.2	8.6	613.8	10.3	101.26
35_mz174				0.06075	0.9	-2.8273	25.0	-0.33756	25.0	1.00	630.3	18.6	#VALOR!	392.4	-2654.7	-820.0	-421.21
36_mz174				0.05958	0.7	-0.9852	40.7	-0.11992	40.7	1.00	588.5	15.0	-4277.7	-27479.0	-823.5	-357.1	-139.94
37_mz174				0.06580	2.1	3.4626	18.0	0.38167	17.9	0.99	800.0	44.8	1518.7	142.0	2084.1	318.6	260.52
38_mz174				0.05937	1.5	-3.2477	39.4	-0.39674	39.4	1.00	580.7	32.7	#VALOR!	578.2	-3258.1	-1669.8	-561.09
42_mz174				0.06108	1.4	-8.8856	40.7	-1.05517	40.7	1.00	641.9	30.0	#VALOR!	465.4	#VALOR!	50126.9	#VALOR!
43_mz174				0.06046	2.1	-2.4496	36.2	-0.29386	36.1	1.00	620.0	44.6	#VALOR!	620.7	-2243.0	-968.9	-361.75
44_mz174				0.06531	2.3	12.1562	22.6	1.34996	22.5	0.99	784.3	47.9	2616.5	212.3	5507.8	833.7	702.24

45_mz174	592	3005	5.08	0.05901	2.6	0.7335	4.2	0.09015	3.2	0.92	567.4	57.5	558.6	17.8	556.4	17.1	98.06
48_mz174	270	1521	5.64	0.05737	2.0	0.5395	17.8	0.06820	17.7	0.99	506.0	43.6	438.1	63.4	425.3	72.8	84.05
49_mz174	475	1751	3.68	0.06320	0.4	0.8533	0.8	0.09792	0.7	0.83	715.0	8.3	626.4	3.6	602.2	3.8	84.22
50_mz174	233	1599	6.86	0.06419	1.1	2.8597	15.8	0.32310	15.8	1.00	748.0	23.5	1371.4	119.0	1804.9	248.4	241.29
51_mz174	99	480	4.83	0.06918	3.5	-0.3581	220.8	-0.03754	220.7	1.00	904.0	72.8	-450.1	-1250.5	-246.7	-555.0	-27.29
56_mz174				0.34471	15.5	13.6717	446.7	0.28765	446.4	1.00	3683.8	236.1	2727.2	4226.1	1629.8	6428.3	44.24
57_mz174				-0.09203	279.1	-66.2295	293.1	5.21932	89.5	0.31	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	3021.8	11781.9	4842.2	#NUM!
58_mz174				0.01026	1016.9	7.1311	1018.4	5.04165	54.2	0.05	#NUM!	#NUM!	2127.9	9068.8	11595.0	2911.8	#NUM!
51_mz174				0.06899	3.7	-0.3211	252.5	-0.03376	252.5	1.00	898.3	76.4	-393.3	-1212.9	-221.4	-568.7	-24.64
61_mz174				0.07218	153.0	21.4927	173.0	2.15974	80.7	0.47	990.9	3111.5	3161.1	1678.4	7416.5	3557.0	748.48
235_mz174				0.04320	176.5	-46.1631	207.4	-7.75039	109.0	0.53	-156.2	4384.9	#VALOR!	2153.0	#VALOR!	8065.4	#VALOR!
236_mz174				1.69227	335.5	#####	339.0	6.08566	48.6	0.14	5966.5	4591.9	7370.8	3439.9	12622.6	2690.9	211.56
237_mz174				-3.86450	39.9	-194.1893	374.5	0.36444	372.4	0.99	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	3822.2	2003.2	6411.5	#NUM!
62_mz106.6	9	1	0.09	0.11836	35.9	12.3312	68.5	0.75558	58.3	0.85	1931.7	643.4	2629.9	643.5	3628.0	1618.6	187.82
63_mz106.6				-0.06641	65.6	-19.1899	126.2	2.09568	107.8	0.85	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	1351.9	7284.5	4706.3	#NUM!
64_mz106.6				0.19332	105.0	-19.7455	230.1	-0.74077	204.8	0.97	2770.6	1722.0	#VALOR!	2461.4	-8703.0	-37726.6	-314.12
80_mz106a	93	35	0.38	0.02730	21.2	0.0148	659.8	0.00392	659.4	1.00	#NUM!	#NUM!	14.9	97.4	25.2	166.0	#NUM!
81_mz106b	259	76	0.29	0.48649	222.9	7.9536	667.0	0.11857	628.7	0.94	4200.8	3293.6	2225.8	6016.4	722.4	4296.0	17.20
82_mz106c	405	45	0.43	-0.02165	239.8	1.5254	241.2	-0.51092	25.8	0.11	#NUM!	#NUM!	940.6	1479.4	-4610.7	-1736.7	#NUM!
83_mz106d	148	32	0.21	0.39093	156.0	#####	222.2	-79.11110	158.2	0.90	3874.5	2350.9	#VALOR!	2256.7	#VALOR!	10329.5	#VALOR!
86_mz106e				0.87273	41.4	725.6824	158.3	6.03064	152.8	0.97	5045.3	586.7	6689.8	1605.6	12572.3	8450.8	249.19
87_mz106f				-0.72727	149.6	29.4708	179.7	-0.29390	99.6	0.55	#NUM!	#NUM!	3469.3	1764.6	-2243.3	-2671.4	#NUM!
88_mz106g				0.26261	15.7	44.8974	26.5	1.23999	21.4	0.81	3262.4	246.9	3885.3	263.4	5198.8	762.9	159.36
89_mz106h				0.38908	9.3	8.7475	23.3	0.16306	21.3	0.98	3867.4	140.8	2312.0	211.9	973.8	192.5	25.18
92_mz106i				0.12349	15.9	-4.3590	60.2	-0.25600	58.1	0.96	2007.3	281.7	#VALOR!	793.5	-1906.3	-1288.6	-94.97
93_mz106j	1	19	15.37	0.52183	4.2	64.6043	50.2	0.89791	50.0	1.00	4304.1	61.7	4248.0	501.8	4130.5	1525.0	95.97
88_mz106g				0.28804	16.4	48.1145	26.9	1.21152	21.3	0.79	3407.0	254.6	3954.1	267.2	5116.4	752.6	150.17
89_mz106h				0.38794	9.3	8.8025	22.5	0.16457	20.5	0.98	3863.0	140.5	2317.8	205.5	982.1	186.9	25.42
97_mz106l	6	5	0.82	0.16003	61.0	14.2708	154.6	0.64675	142.1	0.92	2456.0	1030.6	2767.9	1467.3	3215.5	3598.1	130.92
98_mz106m	3	329	131.09	0.36260	56.4	10.3279	69.5	0.20658	40.5	0.58	3760.8	856.8	2464.6	642.9	1210.6	446.7	32.19
99_mz106n	2	592	256.93	0.39471	3.7	407.3832	23.9	7.48554	23.6	0.99	3889.1	55.0	6104.7	242.0	13784.8	1342.9	354.45
100_mz106o	2	25	13.91	0.85877	349.7	196.1346	359.3	1.65645	82.4	0.43	5022.5	4958.7	5365.2	3629.7	6298.1	3310.8	125.40
212_mz106.12	93	35	0.38	0.15908	139.4	5.3125	6503.2	0.24220	6501.7	1.00	2445.9	2359.7	1870.9	55571.8	1398.1	81720.7	57.16
221_mz106.12				0.30467	73.2	271.7626	122.0	6.46923	97.5	0.80	3494.2	1132.2	5694.9	1233.9	12962.4	5446.2	370.97
222_mz106.14				0.34561	39.0	-26.2020	1022.8	-0.54986	1022.0	1.00	3687.7	594.5	#VALOR!	10797.2	-5145.5	-80479.4	-139.53
223_mz106.xx				-0.07638	41.0	-9.6792	48.5	0.91904	25.9	0.53	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	549.4	4201.9	800.0	#NUM!
224_mz106.xx	5	109	22.65	0.16788	174.2	17.5679	317.0	0.75895	264.9	0.95	2536.7	2921.5	2966.4	3045.4	3640.4	7366.8	143.51
227_mz106.9				0.14975	64.9	6.4143	66.7	0.31065	15.5	0.23	2343.1	1109.6	2034.2	586.0	1743.9	237.5	74.43
228_mz106.8				-0.14339	93.8	-8.3761	279.9	0.42366	263.7	0.94	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	3227.4	2277.1	5059.0	#NUM!
229_mz44069				0.06409	2.0	207.2361	24.1	23.45182	24.0	1.00	744.6	42.7	5420.8	243.8	20607.3	1486.8	2767.60
230_mz44069	323	1252	3.88	0.05995	0.6	0.8254	1.9	0.09986	1.8	0.98	601.6	13.9	611.1	8.6	613.6	10.3	101.99
227_mz106.9				0.05077	307.3	2.3308	307.6	0.33294	15.2	0.05	230.6	7095.7	1221.7	2185.8	1852.6	244.0	803.48
228_mz106.8				-0.54167	61.9	-38.7721	236.7	0.51914	228.4	0.97	#NUM!	#NUM!	#VALOR!	2466.9	2695.5	5032.4	#NUM!
943_mz106k				0.19828	123.8	-11.8716	278.8	-0.43425	249.8	0.97	2812.1	2023.0	#VALOR!	3091.0	-3671.9	-12359.2	-130.58