

Composição Química da Turmalina de Turmalinitos Estratiformes da Mina de Passagem de Mariana, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG)

Chemical Composition of the Tourmaline from Stratiform Tourmalinites of the Passagem de Mariana Gold Mine, Southeastern Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil)

Gianna Maria Garda (giagarda@usp.br), Johann Hans Daniel Schorsch (hascho@usp.br), Paulo Beljavskis (beljavskis@terra.com.br), Marcos de Souza Mansueto (mansueto@usp.br), Margareth Sugano Navarro (msugano@usp.br), Andrezza Alves Mota (andrezza.mota@usp.br)
Departamento de Mineralogia e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP
R. do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR

Recebido em 20 de outubro de 2008; aceito em 05 de março de 2009

RESUMO

A mina subterrânea de Passagem de Mariana é uma das minas de ouro mais antigas do Brasil. O ouro associa-se a turmalinitos estratiformes e veios e brechas de quartzo e carbonato com turmalina. Os turmalinitos estratiformes pertencem à Formação Batatal (Grupo Caraça, Supergrupo Minas) e neles foram registrados os teores mais elevados de ouro (até 200 g/t). Três tipos de turmalina constituintes dos turmalinitos foram analisados por microsonda eletrônica e por ICP-MS. O tipo 1 corresponde à turmalina muito fina que compõe os turmalinitos maciços que ocorrem como níveis contínuos ou boudinados e como fragmentos em veios e brechas de quartzo-carbonato. A turmalina do tipo 2 é um pouco mais grossa que a do tipo 1, é zonada e compõe turmalinitos maciços e bandados. A turmalina do tipo 3 é grossa, zonada, e cresce perpendicularmente ao contato do turmalinito ou fragmentos deste com veios e brechas de quartzo-carbonato. As principais variações composicionais nos três tipos de turmalina são diminuição nos teores de SiO₂ e Al₂O₃ e aumento nos de MgO, Na₂O e F, que acompanham aumento nos teores de CaO e TiO₂. Quanto aos elementos-traço, nos tipos 2 e 3, além do aumento das concentrações totais de ETR, há enriquecimento de ETR leves, Rb, Sr, Y, Cs, Th e U em relação ao tipo 1. As variações composicionais são condizentes com as condições geoquímicas reinantes durante a diagênese e o metamorfismo. Não foram encontradas evidências de contribuição de fluidos externos (e.g., magmáticos) na geração dos turmalinitos estratiformes, cuja principal fonte de boro pode ter sido os metapelitos carbonáceos da Formação Batatal. Assim, não se descarta totalmente a origem singenética dos turmalinitos, cuja formação pode ter evoluído durante o metamorfismo progressivo do início do Evento Transamazônico. A turmalina do tipo 3, por desenvolver-se no contato entre o turmalinito e veios e brechas de quartzo-carbonato, pode ter sido gerada após o pico metamórfico e durante a fase extensional do Evento Transamazônico, com a remobilização do ouro em veios e brechas.

Palavras-chave: Mina de ouro de Passagem de Mariana; Turmalinitos estratiformes; Formação Batatal; Grupo Caraça; Supergrupo Minas.

ABSTRACT

The Passagem de Mariana Mine in the southeastern part of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, is one of the oldest Brazilian gold mines. Gold is associated with stratiform tourmalinites and tourmaline-bearing quartz and carbonate veins and breccias. The highest gold contents (up to 200 g/t) have been recorded in the stratiform tourmalinites, which belong to the Batatal Formation (Caraça Group, Minas Supergroup). Three petrographic types of tourmaline have been defined and analyzed by electron microprobe and ICP-MS. Type 1 corresponds to the very fine-grained tourmaline that composes homogeneous tourmalinites. They occur as continuous levels or boudins, and as fragments in quartz-carbonate veins and breccias. Type 2 zoned tourmaline is coarser-grained and composes both homogeneous and banded tourmalinites. Type 3 coarse-grained, zoned tourmaline grows perpendicularly to the contact between the tourmalinito or its fragments and the quartz-carbonate veins and breccias. The main chemical variations observed in the three tourmaline types are de-

crease of SiO_2 and Al_2O_3 and increase of MgO , Na_2O and F contents with increasing CaO and TiO_2 contents. Additionally, types 2 and 3 tourmalines also contain higher concentrations of LREE, Rb, Sr, Y, Cs, Th and U in relation to type 1. These chemical variations are coherent with the geochemical conditions that prevail during diagenesis and metamorphism. No evidence was found of the participation of external (e.g., magmatic) fluids in the generation of the stratiform tourmalinites, for which the main source for boron could have been the Batatal Formation carbonaceous metapelites. Therefore, the syngenetic origin of the tourmalinites cannot be completely ruled out. The tourmalinites could have evolved during the prograde metamorphism of the beginning of the Transamazonian Event. Type-3 tourmaline, grown in the contact between the tourmalinite and quartz-carbonate veins and breccias, could have been generated after the metamorphic peak and during the extensional phase of the Transamazonian Event, with gold remobilization in veins and breccias.

Keywords: Passagem de Mariana gold mine; Stratiform tourmalinites; Batatal Formation; Caraça Group; Minas Supergroup.

INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero foi a região brasileira que mais produziu ouro no século 18, destacando-se a área delimitada pelas localidades de Ouro Preto, Mariana, Congonhas do Campo, Nova Lima, Raposos, Sabará, Caeté, Santa Bárbara e Ponte Nova (Ladeira, 1988). A maioria dos depósitos insere-se no contexto geológico do Grupo Nova Lima (*greenstone belt* arqueano Rio das Velhas). Lobato et al. (1998) destacam três estilos principais de mineralização de ouro, representados por:

1. zonas sulfetadas por substituição, segundo o controle estrutural, em formação ferrífera bandada da fácies óxido e carbonato (e.g., Cuiabá, Raposos e São Bento);
2. zonas de alteração hidrotermal com sulfetos disseminados nas encaixantes cisalhadas (e.g., Juca Vieira e Santana);
3. veios de quartzo com carbonatos e sulfetos (e.g., Mariana).

Segundo esses autores, os processos responsáveis pela deposição do ouro seriam os mesmos que levaram à geração de associações de alteração hidrotermal, caracterizadas pela combinação de quartzo, carbonato, micas, albita, cloritas, pirita, pirrotita e arsenopirita. Nessas associações, a turmalina pode ocorrer tanto como acessório ou como fase principal. O estilo de mineralização proposto por Lobato et al. (2001) é o de ouro orogênico, como definido por Groves et al. (1998).

A Mina de Passagem de Mariana (sudeste do Quadrilátero Ferrífero) produziu, de 1864 a 1954, 60 t de ouro (Vial et al., 2007). Uma característica importante das zonas mineralizadas é a presença de turmalinitos e veios de quartzo e carbonato com turmalina. Eschwege referiu-se a essa associação como ouro-“carvoeira” (em: Ladeira, 1988; Oliveira et al., 1996). Na literatura há controvérsias não apenas no que diz respeito ao posicionamento estratigráfico da Mina de Passagem de Mariana, mas também quanto à contemporaneidade dos turmalinitos e a deposição do

ouro e quanto aos estilos de mineralização. Como revisito em Ladeira (1988), Fleischer (1971) e Fleischer e Routhier (1973) destacam o papel dos processos sedimentares e exalativos na geração dos depósitos de ouro. Por sua vez, Vial (1988) e Vial et al. (2007) enfatizam que mineralização de ouro é epigenética e está associada ao tectonismo.

Neste trabalho são analisados três tipos de turmalina de turmalinitos estratiformes da Mina de Passagem de Mariana por meio de microsonda eletrônica (elementos maiores e flúor) e ICP-MS (elementos terras raras e alguns elementos-traço), com o intuito de caracterizar os fluidos formadores dos turmalinitos e tecer considerações sobre sua origem e relação com a mineralização de ouro.

A MINA DE PASSAGEM DE MARIANA: CONTEXTO GEOLÓGICO E MINERALIZAÇÃO AURÍFERA

A mina subterrânea de ouro de Passagem de Mariana localiza-se a 100 km de Belo Horizonte, no domínio do Anticlinal de Mariana (Figura 1).

A profundidade da mina é de 409 m, dividida em níveis espaçados na vertical de cerca de 20 m. O nível mais profundo da mina é denominado 1340. Atualmente a mina encontra-se alagada abaixo do nível 315, cerca de 80 m abaixo da superfície. O corpo de minério denominado Fundão localiza-se na porção noroeste da mina e, apesar da lavra estar desativada, parte desta porção está aberta à visitação.

O Anticlinal de Mariana é constituído por rochas arqueanas do Supergroupo Rio das Velhas e proterozoicas do Supergroupo Minas, que se encontram justapostas por cavalgamento (Ladeira, 1984, apud Ladeira, 1988). Dorr (1969), adotando o conceito eugeossinclinal, definiu a Série Rio das Velhas e a dividiu em duas unidades: o Grupo Nova Lima, mais antigo, constituído por rochas vulcânicas e sedimentares detríticas e químicas metamorfozadas na fácies xisto-verde, e o Grupo Maquiné que, na localidade-tipo (Vargem do Lima), foi dividido em Formação Palmital, constituída principalmente por quartzitos sericíticos, filitos quartzosos e filitos, e Formação Casa Forte, composta

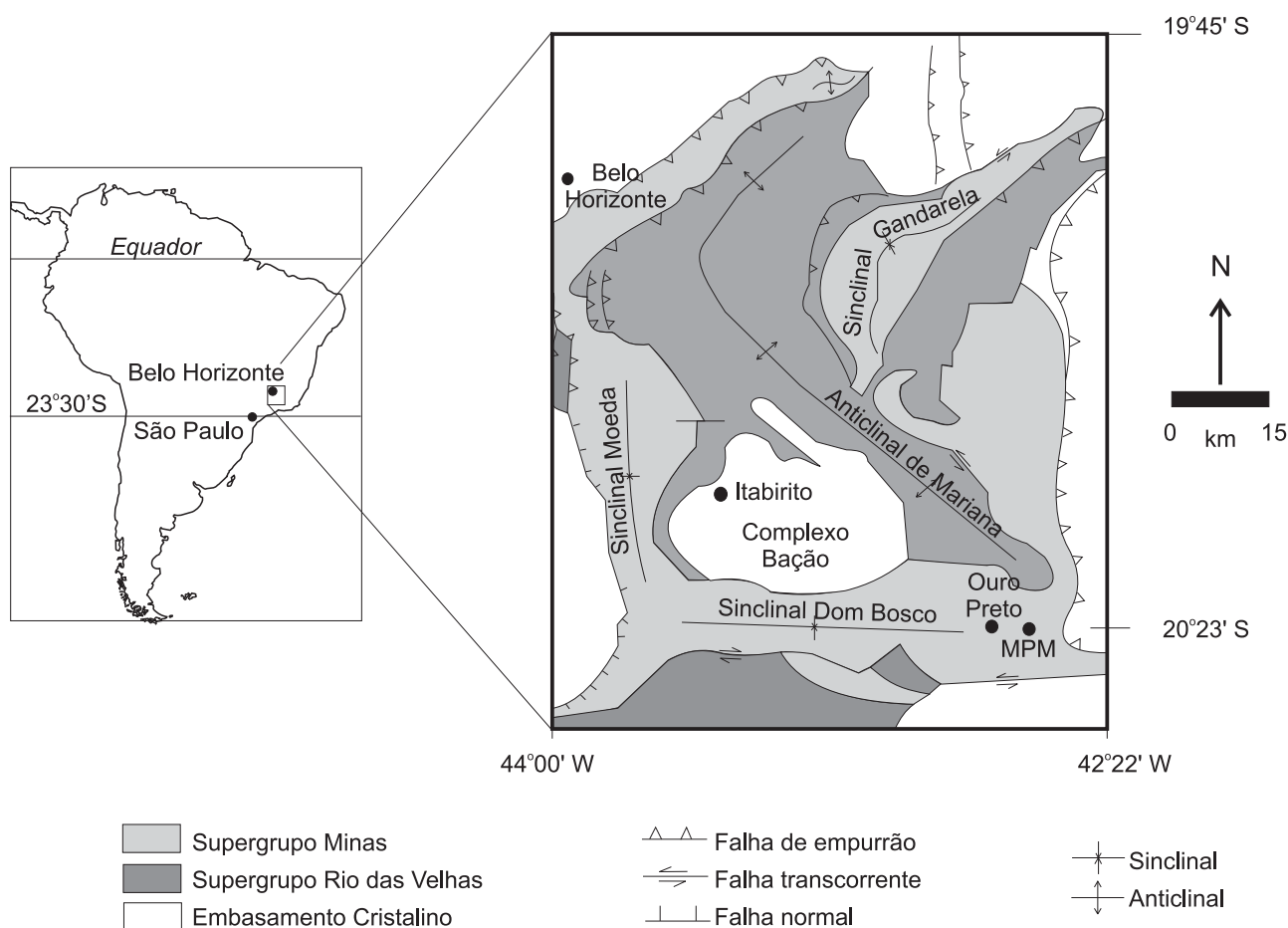


Figura 1. Mapa geológico simplificado da porção sul do Quadrilátero Ferrífero, com a localização da Mina de Passagem de Mariana (MPM).

por conglomerados, quartzitos sericíticos e cloríticos, xistos e filitos sericíticos e cloríticos. Com a identificação de komatiitos na base da Série Rio das Velhas, os quais denominou de Grupo Quebra Osso, Schorscher (1984, 1992) redefiniu-a como Supergrupo Rio das Velhas, representativo do *greenstone belt* arqueano homônimo.

Ainda de acordo com o conceito eugeossinclinal, Dorr (1969) dividiu a Série Minas em quatro grupos, da base para o topo: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba. Segundo as folhas de Antônio Pereira, Mariana, Rio das Bandeiras, Ouro Preto, Santa Rita de Ouro Preto e São Bartolomeu de A.L.M. Barbosa (em Dorr, 1969), as unidades que ocorrem na região de Passagem de Mariana incluem o Grupo Caraça e o Grupo Itabira. Ao primeiro pertencem a Formação Moeda (metaconglomerados, quartzito e metapelitos) e a Formação Batatal (metapelitos carbonáceos e dolomitos ferruginosos). O Grupo Itabira é representado pelas formações Cauê (itabiritos) e Gandarela (dolomitos).

Maxwell (1958) menciona que na área-tipo da Formação Batatal (cabeceira do Rio Piracicaba, 3 km a leste da Serra do Batatal) sua espessura atinge 30 m, sendo composta quase que inteiramente por um filito muito fino, cinza claro a cinza escuro, com pequenos aglomerados de pirita disseminados. Em outras localidades do Quadrilátero Ferrífero, a espessura da formação varia de alguns centímetros a mais de 250 m. Localmente, em particular nas porções a sul e oeste do Quadrilátero Ferrífero, o filito torna-se arenoso. Nas proximidades de Itabira, *chert* e lentes de formação ferrífera intercalam-se com o filito. Na Mina de Passagem de Mariana, Vial et al. (2007) descrevem uma rocha calcária bandada intercalada aos metapelitos carbonáceos, que consideram como da Formação Batatal. O contato entre a Formação Batatal e a Formação Moeda é abrupto e localmente gradacional. O contato superior com a Formação Cauê é gradacional e pode estende-se por alguns metros. Na Mina de Passagem de Mariana esse con-

tato é estratigráfico tectonizado, reflexo do cavalgamento do Supergrupo Minas sobre o Grupo Nova Lima.

Barbosa, Grossi-Sad e Dorr (1974), além de outros pesquisadores que participaram dos trabalhos conjuntos DNPM-USGS (em Dorr, 1969), relacionam a mineralização de ouro ao cavalgamento do Supergrupo Minas sobre o Grupo Nova Lima. Segundo Vial et al. (2007), veios de quartzo auríferos estão confinados a uma zona tabular que resultou desse cavalgamento e que se situa na base dos itabiritos da Cauê. A zona mineralizada estende-se por mais de 23 km, de Ouro Preto a Antônio Pereira. As minas de Passagem de Mariana, Mata Cavalo e Morro Santana constituem os principais corpos de minério e situam-se na base dos itabiritos, ao passo que as minas de Veloso e Antônio Pereira estão inseridas nos itabiritos e as minas de Rocinha e Ouro Preto, nos quartzitos do Grupo Caraça. Para esses autores e na literatura mais recente, a mineralização de ouro é epigenética e está associada ao tectonismo.

Entretanto, Ladeira (1988) e Slack (1996) classificam o depósito de ouro associado aos turmalinitos da Formação Batatal na Mina de Passagem de Mariana como do tipo *stratabound*, localmente estratiforme. Nesse minério foram detectados os teores de ouro mais elevados, de até 200 g/t. Cavalcanti (2003) associa a mineralização de ouro tanto ao turmalinito estratiforme como aos veios de quartzo e de quartzo-carbonato. Adicionalmente, descreve “halos de alteração” de 30 cm de espessura, resultantes de turmalinização, sulfetação e silicificação, associados a níveis ricos em sericita-biotita-carbonato presentes nos sericita-quartzo xistos, nas rochas carbonáticas e no filito carbonáceo. Os “halos” apresentam estruturas de deformação (dobras abertas assimétricas), relacionadas aos eventos tectônicos associados à mineralização.

Duarte (1991) propõe que a mineralização deu-se em seis estágios, sendo que os três primeiros (D_1 a pós- D_2 /pré- D_3), ocorridos durante o metamorfismo regional progressivo, foram responsáveis pela formação dos minerais de ganga (quartzo, carbonato e turmalina) e do turmalinito. Os três últimos estágios (tardi- a pós- D_2), posteriores ao pico metamórfico, caracterizam-se pela deposição de sulfetos e ouro.

A TURMALINA DOS TURMALINITOS DA MINA DE PASSAGEM DE MARIANA

A presença de turmalina no Supergrupo Minas é frequente como constituinte menor ou traço. Não só ocorre na Formação Batatal (schorlita fina, zonada, com núcleos amarelos para bordas azuis), como também nos quartzitos da Formação Moeda (incolor) e nos itabiritos da Formação Cauê (schorlita fina, fracamente zonada, mais escura nas bordas). Segundo Cavalcanti e Schrank (1999) e Caval-

canti (2003) são três os modos de ocorrência da turmalina na região do Anticlinal de Mariana: 1. turmalina em corpos estratiformes de turmalinitos; 2. turmalina em “halos” resultantes da alteração hidrotermal das encaixantes da mineralização; 3. turmalina como componente dos veios mineralizados.

No corpo de minério denominado Fundão, os turmalinitos estratiformes que são objeto do presente estudo ocorrem como: níveis contínuos de turmalinito maciço fino, encaixadas nos dolomitos ferruginosos da Formação Batatal e no contato entre veio de quartzo e suas encaixantes (Figura 2A); níveis boudinados no contato entre veios de quartzo e suas encaixantes (Figura 2B), e fragmentos em brecha com matriz quartzo-carbonática e em veios concordantes e discordantes de quartzo-carbonato (Figura 2C). Estudos petrográficos mostram que é comum o crescimento de turmalina perpendicularmente às bordas dos fragmentos de turmalinito, próximo ao contato com brechas e veios de quartzo e carbonato (Figuras 3A e 3B). Turmalina mais grossa também se desenvolve em veios de quartzo (Figura 3C) e bolsões de quartzo (Figura 3D), principalmente próximo ao contato com turmalinito. Quando a turmalina é mais grossa, é possível observar ao microscópio variações de cor e tonalidade num mesmo cristal, definindo zonas regulares ou difusas (Figuras 3E e 3F). Com base nas características petrográficas, distinguem-se três tipos principais de turmalina:

Tipo 1: turmalina fina, em que não é possível observar zoneamento de cor ao microscópio óptico, que compõe turmalinito maciço;

Tipo 2: turmalina zonada, um pouco mais grossa que o tipo 1, que compõe turmalinito maciço ou bandado;

Tipo 3: turmalina grossa que cresce perpendicularmente às bordas dos fragmentos de turmalinito.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA TURMALINA

Métodos analíticos

Os três tipos de turmalina constituintes dos turmalinitos da Mina de Passagem de Mariana foram analisados por meio de microsonda eletrônica (elementos maiores e F) e de ICP-MS (elementos-traço e elementos terras raras).

Microsonda Eletrônica

Seções delgadas polidas de sete amostras de turmalinito foram recobertas com carbono para a análise de turmalina por meio da microsonda eletrônica JEOL Superprobe, modelo JXA-8600, do Laboratório de Microsonda Eletrônica do IGc/USP. As condições de operação foram: diâme-

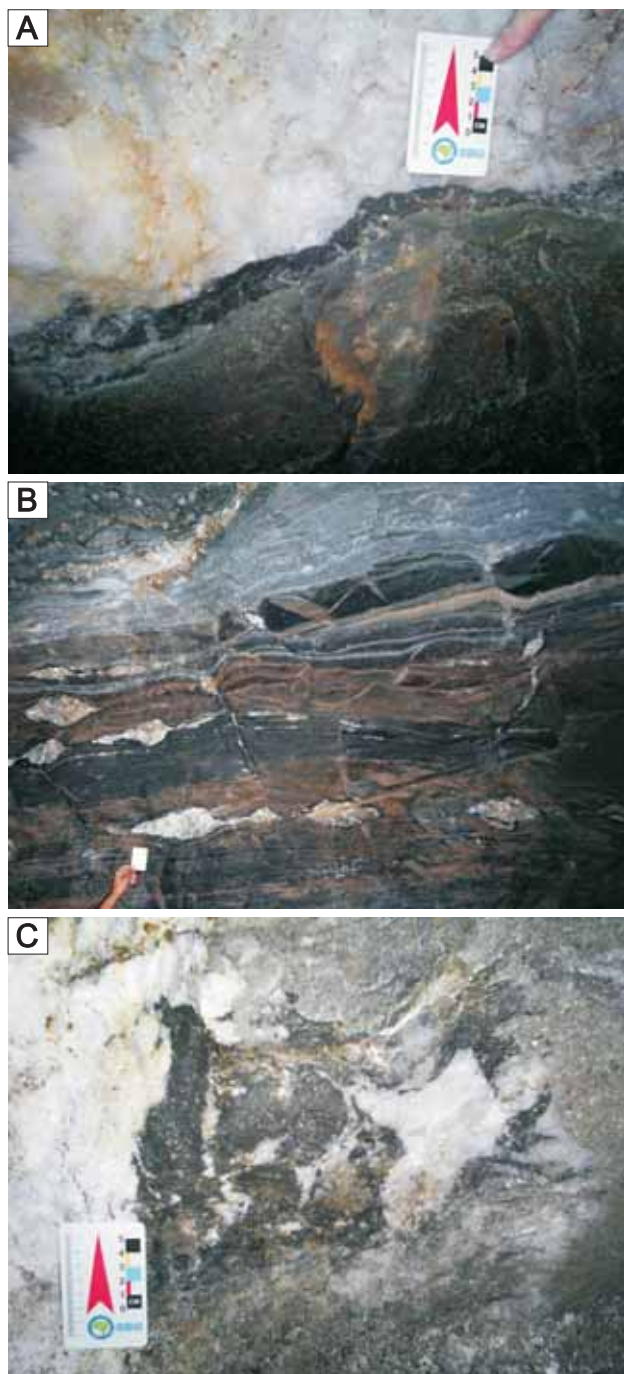


Figura 2. Modos de ocorrência de turmalinitos na Mina de Passagem de Mariana. **A.** Nível de turmalinito maciço no contato entre veio de quartzo e dolomito (nível 175). **B.** Sequência de níveis disruptos de turmalinito e de veios boudinados de quartzo em dolomito e biotita quartzo xisto da Formação Batatal (nível 315). Observar as diferenças de competência dos níveis de turmalinito (fragmentados) e dos veios de quartzo (boudinados) frente à deformação. **C.** Brecha constituída por fragmentos de turmalinito maciço e matriz quartzo-carbonática (nível 175).

tro do feixe de 1-2 μm , corrente de 15 nA e tensão de aceleração de 15 kV.

Análise de elementos terras raras (ETR) por ICP-MS

Pela primeira vez no Laboratório de Química do IGc/USP foram analisados ETR e alguns elementos-traço (Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Pb, Th e U), utilizando-se separados de turmalina. Para isso, foi adaptada a rotina para análises de rocha total desenvolvida por Navarro (2004) e que se encontra descrita em Mota (2006). O material de referência escolhido foi o basalto BR do *Centre de Recherches Petrographiques et Geochimiques* da França. As análises de seis frações de separados de turmalina (três do tipo 1 e três dos tipos 2 e 3) foram realizadas com o espectrômetro de massa ICP-MS ELAN 6100 DRC, da marca Perkin Elmer.

Resultados

O grupo da turmalina configura-se como uma série de soluções sólidas de silicatos de boro complexos, normalmente descritos pelas proporções dos membros finais constituintes e fórmula geral (Hawthorne e Henry, 1999): $\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{O},\text{OH})_3(\text{OH},\text{F},\text{O})(\text{BO}_3)_3[\text{T}_6\text{O}_{18}]$, onde:

X = Na, Ca, K, podendo ocorrer vacância nesta posição

Y = Al, Li, Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn, Cr^{3+} , V^{3+} , Ti^{4+}

Z = Al, Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Mg

B = B

T = Si, Al.

O Apêndice 1 apresenta os resultados das análises por microsonda eletrônica dos três tipos de turmalina com as respectivas distribuições de íons em base de 31 átomos de oxigênio, 3 átomos de boro e calculando-se Fe^{3+} como o necessário para suprir eventual insuficiência de Al para preencher a posição Z com 6 átomos. A Tabela 1 apresenta os teores médios dos óxidos e de F (em peso %) para os três tipos de turmalina.

Em diagramas Fe-Al-Mg (Henry e Guidotti, 1985), a maioria dos dados para os três tipos de turmalina agrupam-se no campo referente a metapelitos e metapsamitos saturados em Al (campo 4). Os dados restantes posicionam-se no campo dos metapelitos e metapsamitos sem minerais indicadores de saturação em Al (campo 5 - Figuras 4A, 4B e 4C). Os três tipos de turmalina são membros da série schorlita-dravita, com o componente dravita variando ao redor de 70% (Figuras 4D, 4E e 4F), e razões $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$ (proporções atômicas) de até 40%.

Para os tipos 1 e 2, os diagramas $\text{TiO}_2 \times \text{CaO}$ caracterizam campos distintos para teores de $\text{TiO}_2 < 0,5\%$ e

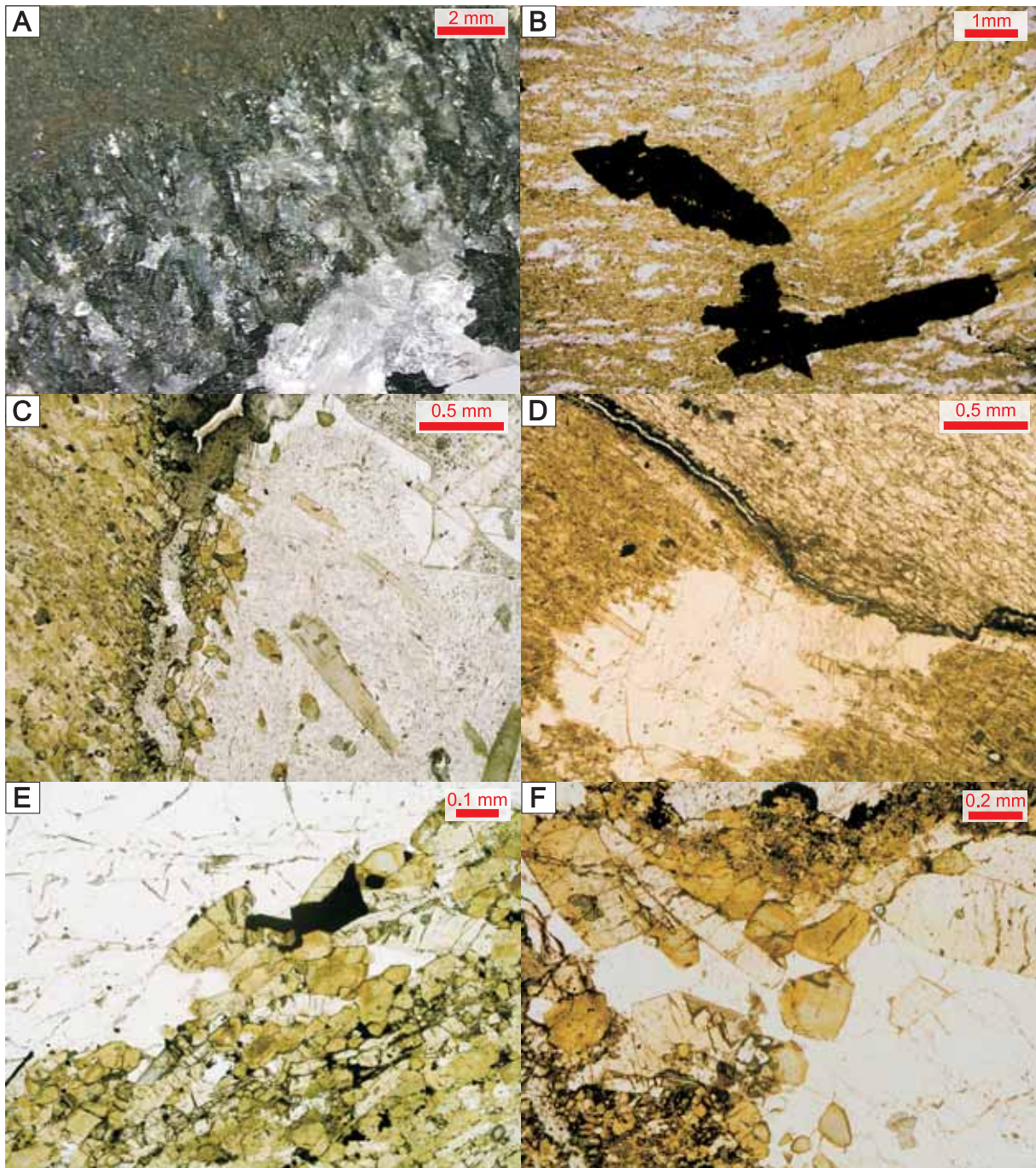


Figura 3. A. Fotografia do arranjo de turmalina grossa do tipo 3, crescida nas bordas de fragmento de turmalinito maciço fino (amostra MP-12). B. Fotomicrografia destacando o crescimento de arsenopirita no contato do turmalinito maciço fino formado por turmalina do tipo 1 e o arranjo de turmalina grossa do tipo 3 (amostra MP-18, nicois paralelos). C. Crescimento de turmalina zonada próximo ao contrato entre o turmalinito maciço formado por turmalina do tipo 1 e veio de quartzo (amostra MP-01, nicois paralelos). D. Turmalinito maciço formado por turmalina do tipo 1, com bolsão de quartzo onde se desenvolve turmalina mais grossa (amostra MP-16, nicois paralelos). E. Turmalinas zonadas, com núcleos verdes e bordas castanhas, do turmalinito maciço formado por turmalina do tipo 2 (amostra MP-08B, nicois paralelos). F. Turmalinas zonadas do turmalinito maciço formado por turmalina do tipo 2 (amostra MP-14, nicois paralelos).

Tabela 1. Teores médios dos óxidos e de F (em peso %) das turmalinas finas do tipo 1, turmalinas zonadas do tipo 2 e turmalinas grossas do tipo 3.

| | TiO ₂ | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MgO | CaO | Na ₂ O | F |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------|
| Tipo 1 | | | | | | | | |
| MP-01 (TiO ₂ < 0,5) | 0,34 | 36,8 | 33,1 | 5,87 | 7,22 | 0,37 | 1,77 | 0,19 |
| MP-01 (TiO ₂ > 0,5) | 0,68 | 36,6 | 32,2 | 5,94 | 7,66 | 0,66 | 1,98 | 0,21 |
| MP-11 (TiO ₂ < 0,5) | 0,28 | 37,3 | 33,3 | 5,38 | 7,80 | 0,29 | 1,98 | 0,15 |
| MP-11 (TiO ₂ > 0,5) | 0,65 | 36,8 | 32,2 | 5,58 | 8,24 | 0,69 | 2,07 | 0,16 |
| MP-16 (TiO ₂ < 0,5) | 0,34 | 37,0 | 33,4 | 5,72 | 7,37 | 0,42 | 1,82 | 0,08 |
| MP-16 (TiO ₂ > 0,5) | 0,69 | 35,6 | 32,8 | 5,82 | 7,73 | 0,97 | 1,83 | 0,13 |
| Tipo 2 | | | | | | | | |
| MP-8B (núcleo) | 0,21 | 36,8 | 33,8 | 5,90 | 7,05 | 0,55 | 1,59 | 0,06 |
| MP-8B (borda) | 0,63 | 36,5 | 33,1 | 5,63 | 7,36 | 0,95 | 1,71 | 0,08 |
| MP-14 (núcleo) | 0,20 | 36,8 | 33,9 | 6,15 | 6,96 | 0,42 | 1,61 | 0,06 |
| MP-14 (borda) | 0,67 | 36,2 | 33,5 | 5,69 | 7,58 | 1,05 | 1,72 | 0,15 |
| Tipo 3 | | | | | | | | |
| MP-18 (turmalinito) | 0,33 | 36,8 | 33,8 | 5,47 | 7,30 | 0,64 | 1,67 | 0,09 |
| MP-18 (pente) | 0,56 | 36,3 | 33,2 | 5,62 | 7,48 | 0,84 | 1,72 | 0,16 |

TiO₂ > 0,5% (Figuras 4G, 4H1 e 4H2). Mesmo que variações de cor não sejam perceptíveis ao microscópio (o que se deve à granulação muito fina da turmalina), existem variações composicionais na turmalina do tipo 1. Para TiO₂ < 0,5%, a turmalina do tipo 1 mostra teores médios mais baixos de FeO, MgO, CaO, Na₂O e F e mais altos de Al₂O₃ e SiO₂, em relação à turmalina do mesmo tipo com TiO₂ > 0,5% (Figura 4G).

Variações composicionais que se manifestam em variações de cor são melhor observadas na turmalina do tipo 2. A Figura 4H1 destaca dois campos de teores de TiO₂ e CaO, um para 0% < TiO₂ < 0,4% e 0,4% < CaO < 0,8% e outro para 0,6% < TiO₂ < 0,7% e 0,8% < CaO < 1,2%, que correspondem, respectivamente, aos núcleos verdes e às bordas marrons da turmalina da amostra MP-08B. No caso da amostra MP-14 (Figura 4H2), as variações de cores em um mesmo cristal de turmalina correspondem ao campo definido por 0,5% < TiO₂ < 0,8% e 0,4% < CaO < 1,2%. Para ambas as amostras, aos aumentos em TiO₂ e CaO correspondem aumentos em MgO, Na₂O e F e decréscimos em SiO₂, Al₂O₃ e FeO (Tabela 1).

Decréscimos em SiO₂ e Al₂O₃ e aumentos em TiO₂, FeO, MgO, CaO, Na₂O e F também são observados na turmalina do tipo 3 (Tabela 1). Diferentemente dos outros dois tipos, não se verifica na Figura 4I a definição de campos composicionais específicos para a turmalina do turmalinito e a turmalina grossa que se desenvolve nas bordas do fragmento de turmalinito.

Nos três tipos de turmalina observa-se aumento nos teores de MgO, Na₂O e F e decréscimo nos de SiO₂ e Al₂O₃, com o aumento dos teores de TiO₂ e CaO. Essas variações composicionais correspondem a variações de cor e pleocroísmo nos tipos 2 e 3.

As análises de elementos terras raras e traço por ICP-MS de separados de turmalina são apresentadas na Tabela 2. A Figura 5 apresenta as concentrações desses elementos normalizadas segundo o condrito C1 (Sun e McDonough, 1989). Observam-se padrões de enriquecimento em ETR semelhantes para os separados de turmalina dos tipos 2 e 3, especialmente ao se considerar os ETR leves (Figura 5A). Em relação ao condrito C1, o enriquecimento nesses elementos é da ordem de 30 - 100 vezes. Outra característica ressaltada nos perfis é a fraca anomalia negativa de Eu.

Os separados de turmalina do tipo 1 caracterizam-se pelo padrão menos enriquecido em ETR leves (2 - 40 vezes o condrito C1) e anomalia positiva muito fraca de Eu. A partir do Eu, as concentrações dos ETR pesados aproximam-se dos limites de detecção do método analítico (Figura 5B).

Comparando-se as análises dos separados de turmalina do tipo 3 com as do tipo 1 da mesma amostra (MP-12), observa-se o enriquecimento em ETR leves da ordem de 10 vezes (Figuras 5A e 5B).

Quanto aos demais elementos analisados por ICP-MS, a Figura 6 mostra um enriquecimento em Rb, Sr, Y, Cs, Th e U, a partir do tipo 1 para os tipos 2 e 3.

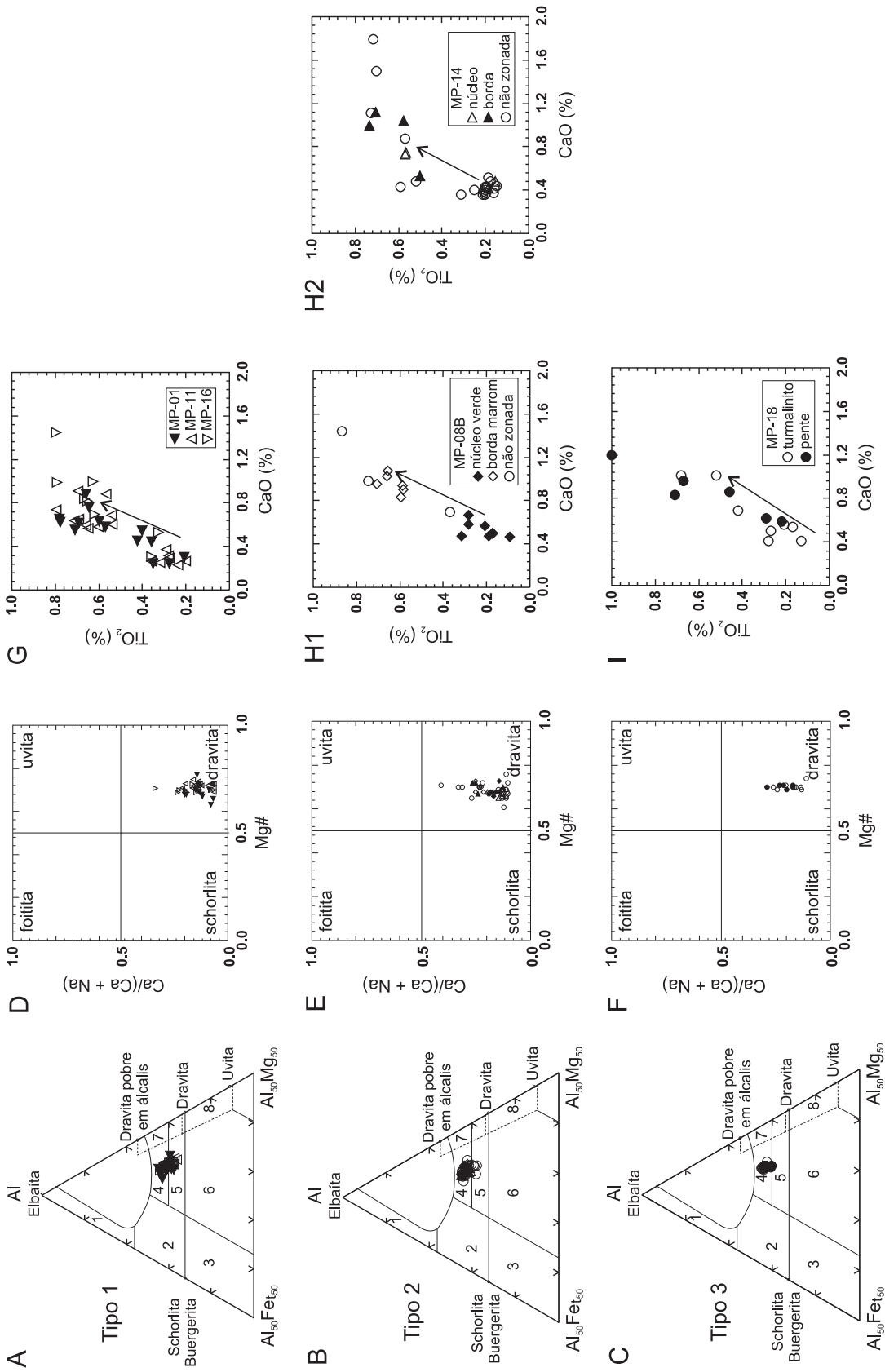
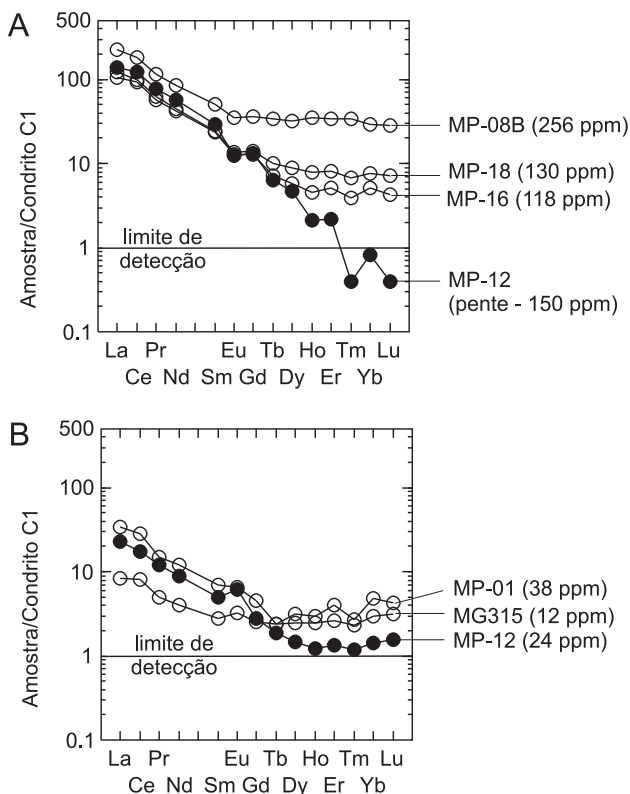
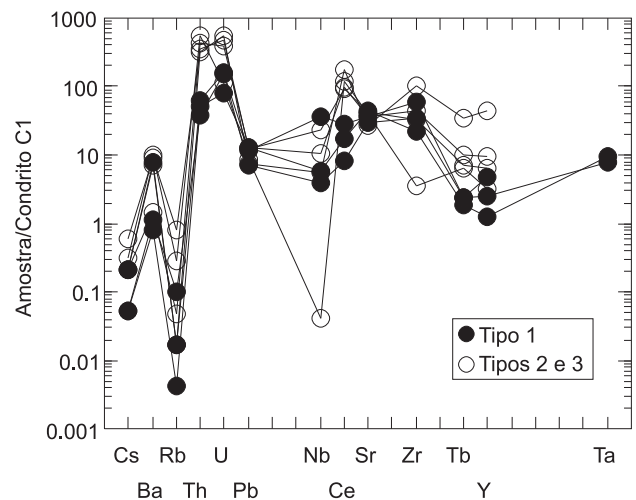


Figura 4. Diagramas de variações composicionais observadas nos três tipos de turmalina da Mina de Passagem de Mariana. **A, B e C.** Diagrama Fe-Al-Mg de Henry e Guidotti (1985) - proporções atômicas. Campos: **1.** Pegmatitos e apilitos de granitoides ricos em Li; **2.** granitoides pobres em Li e pegmatitos e apilitos associados; **3.** granitos hidrotermalizados ricos em quartzo, sendo a turmalina rica em Fe^{3+} ; **4.** metapelitos e metapsamitos com minerais indicadores de saturação em Al; **5.** metapelitos e metapsamitos sem minerais formados pela saturação em Al; **6.** rochas com quartzo, sendo turmalina rica em Fe^{3+} , associadas a rochas cálcio-silicáticas e metapelitos; **7.** rochas metultramáficas (baixo Ca) e metasedimentares ricas em Cr e V; **8.** rochas carbonáticas metamorfizadas e metaproxenitos. **D, E e F.** Diagramas de variação $Ca/(Ca + Na)$ vs. $Mg\#$ [$=Mg/(Fe+Mg)$] - proporções atômicas. **G, H1, H2 e I.** Diagramas de variação de TiO_2 vs. CaO (em peso %). As setas indicam as variações de TiO_2 e CaO observadas internamente aos cristais de turmalina.

Tabela 2. Resultados das análises de elementos terras raras e traço por ICP-MS de separados de turmalina da Mina de Passagem de Mariana (teores em ppm).

| Amostra | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb |
|---------|-------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MP-01 | 8,09 | 17,60 | 1,44 | 5,58 | 1,07 | 0,38 | 0,93 | 0,09 | 0,80 | 0,17 | 0,66 | 0,07 | 0,81 |
| MP-8b | 54,00 | 110,00 | 11,00 | 39,90 | 7,84 | 2,02 | 7,41 | 1,27 | 8,17 | 1,99 | 5,67 | 0,88 | 4,97 |
| MP-12p | 32,70 | 74,00 | 7,28 | 26,90 | 4,45 | 0,73 | 2,72 | 0,24 | 1,20 | 0,12 | 0,36 | 0,01 | 0,14 |
| MP-12 | 5,47 | 10,50 | 1,13 | 4,20 | 0,77 | 0,36 | 0,57 | 0,07 | 0,37 | 0,07 | 0,22 | 0,03 | 0,24 |
| MP-16 | 25,30 | 56,70 | 5,42 | 19,70 | 3,57 | 0,75 | 2,66 | 0,27 | 1,49 | 0,26 | 0,86 | 0,10 | 0,87 |
| MP-18 | 28,80 | 60,60 | 5,90 | 21,00 | 3,71 | 0,80 | 2,93 | 0,38 | 2,25 | 0,44 | 1,34 | 0,17 | 1,31 |
| MG315 | 2,00 | 5,03 | 0,48 | 1,88 | 0,43 | 0,19 | 0,53 | 0,09 | 0,62 | 0,14 | 0,43 | 0,06 | 0,50 |

| Amostra | Lu | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Cs | Ba | Hf | Pb | Th | U |
|---------|------|------|--------|-------|--------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|
| MP-01 | 0,11 | 0,04 | 261,00 | 7,39 | 231,00 | 8,85 | 0,04 | 18,60 | 5,34 | 29,10 | 1,79 | 1,29 |
| MP-8b | 0,72 | 0,04 | 196,00 | 69,50 | 397,00 | 1,33 | 0,04 | 17,40 | 9,47 | 18,50 | 9,14 | 4,42 |
| MP-12p | 0,01 | 0,65 | 290,00 | 4,97 | 14,00 | 0,01 | 0,06 | 24,40 | 0,17 | 21,40 | 15,90 | 0,91 |
| MP-12 | 0,04 | 0,01 | 323,00 | 1,97 | 84,00 | 1,45 | < 0,01 | 1,91 | 2,18 | 31,10 | 1,51 | 0,65 |
| MP-16 | 0,11 | 1,85 | 299,00 | 10,20 | 124,00 | 5,73 | 0,11 | 21,70 | 3,05 | 30,30 | 10,20 | 3,73 |
| MP-18 | 0,18 | 0,11 | 267,00 | 15,20 | 172,00 | 2,64 | 0,04 | 3,44 | 4,30 | 31,20 | 12,30 | 3,07 |
| MG315 | 0,08 | 0,23 | 215,00 | 4,00 | 136,00 | 0,96 | < 0,01 | 2,73 | 3,58 | 17,20 | 1,12 | 1,19 |

**Figura 5.** Concentrações de elementos terras raras (ETR) em separados de turmalina de turmalinitos estratiformes da Mina de Passagem, normalizadas segundo o Condrítico C1 (Sun e McDonough, 1989). Entre parênteses estão indicadas as concentrações totais de ETR.**Figura 6.** Concentrações de elementos traço em separados de turmalina de turmalinitos estratiformes da Mina de Passagem, normalizadas segundo o Condrítico C1 (Sun e McDonough, 1989).

DISCUSSÃO

Como mostram os diagramas Fe-Al-Mg (Figura 4), metapelitos e metapsamitos saturados em Al são indicadores do ambiente de formação dos turmalinitos da Mina de Passagem de Mariana, o que corrobora para que os metapelitos carbonáceos da Formação Batatal sejam os potenciais precursores ou fontes de boro desses turmalinitos.

Henry e Dutrow (1996) consideram duas situações extremas para explicar o crescimento de turmalina durante o metamorfismo. A primeira situação refere-se a um sistema fechado, em que não há perda de boro durante as reações metamórficas. O sistema fornece todo o boro necessário para formar turmalina a partir de um mineral precursor, e.g., muscovita. No metamorfismo de baixo grau e, até mesmo, durante a diagênese, as argilas constituem reservatórios potenciais de boro, de maneira que nas reações que envolvem argilominerais pode haver liberação de boro para formar turmalina. A outra situação é a de um sistema aberto (e.g., metassomatismo), em que o boro é introduzido no sistema por um fluido proveniente de uma fonte externa. Durante as várias etapas do metamorfismo, o sistema pode comportar-se como um sistema aberto ou fechado em relação ao boro. No caso da Mina de Passagem de Mariana os metapelitos carbonáceos da Formação Batatal podem ter sido os reservatórios potenciais de boro para a formação dos turmalinitos já na diagênese, como proposto por Fleischer (1971) e Fleischer e Routhier (1973), uma vez que a concentração de boro em sericita-grafita xistos varia de 68 a 1.000 ppm. Considerando que concentrações da ordem de 200 ppm são suficientes para gerar turmalina (e.g., Marschall et al., 2006), até mesmo os dolomitos da Formação Batatal poderiam ter contribuído para a formação desse mineral. As primeiras turmalinas formadas seriam as dos tipos 1 e 2 com $TiO_2 < 0,5\%$, que são mais ricas em Al_2O_3 . Com o metamorfismo progressivo ocorreriam as variações composicionais caracterizadas pelo empobrecimento em SiO_2 , Al_2O_3 e FeO e enriquecimento em TiO_2 , MgO, CaO, Na_2O e F que, na turmalina zonada do tipo 2, corresponde a variações de cor do núcleo (esverdeado) para a borda (marrom). A turmalina do tipo 3, por desenvolver-se no contato entre o turmalinito e veios e brechas de quartzo e carbonato, pode estar registrando alguma contribuição externa, como, por exemplo, os aumentos nos teores de FeO.

Com relação aos elementos-traço, Pesquera et al. (2005) obtiveram baixas concentrações totais de ETR e anomalias positivas de Eu para alguns turmalinitos do Antiforme Martinamor (Espanha). Segundo esses autores, as anomalias positivas de Eu podem estar registrando um componente de fluido hidrotermal oriundo de uma solução reduzida (com Eu^{2+}) com temperaturas superiores a 200 -

250°C. Estas poderiam ser as condições de formação da turmalina do tipo 1, formada a partir ou coexistente com os metapelitos carbonáceos da Formação Batatal.

Os padrões de ETR obtidos para as turmalinas dos tipos 2 e 3, caracterizados pela anomalia negativa de Eu e enriquecimento em ETR leves, assemelham-se aos apresentados por Grauch (1989) para turmalinas constituintes de metassomatitos, veios hidrotermais e pegmatitos. Segundo esse autor, as concentrações de ETR nas rochas metamórficas é função da composição química do protólito e das condições físico-químicas reinantes. Nas reações metamórficas contínuas, a incorporação de ETR pelos minerais ou pelos fluidos envolvidos depende de como variam os coeficientes de partição fluido-mineral frente às condições de P-T-X. Por outro lado, nas reações metamórficas descontínuas, a disponibilidade do ETR para a reação é controlada pelos minerais que são consumidos e os minerais que são formados na reação. Levando-se em conta que os ETR podem formar complexos carbonáticos a 500 - 600°C, as concentrações de ETR irão variar com a composição mineral da rocha metamórfica e com a capacidade do fluido metamórfico de complexar os ETR e, assim, removê-los do sistema. No caso dos turmalinitos da Mina de Passagem de Mariana, as variações nas concentrações de ETR nos três tipos de turmalina são controladas pelo fluido metamórfico, que se caracteriza por enriquecer as turmalinas do tipo 2 e 3 em ETR. Além do enriquecimento em ETR totais, observam-se nos tipos 2 e 3 enriquecimentos nos teores de ETR leves, Rb, Sr, Y, Cs, Th e U comparativamente ao tipo 1. Segundo Pesquera et al. (2005), uma boa correlação entre Y e Yb (90%, no caso das amostras da Mina de Passagem de Mariana) é consistente com o comportamento geoquímico coerente durante processos hidrotermais e metamórficos.

CONCLUSÕES

Caracterizaram-se as composições químicas de três tipos de turmalina que constituem os turmalinitos estratiformes da Mina de Passagem de Mariana. O tipo 1 corresponde à turmalina muito fina que compõe os turmalinitos maciços que ocorrem como níveis contínuos, níveis boudinados e como fragmentos em veios e brechas de quartzo-carbonato. A turmalina do tipo 2 é um pouco mais grossa, zonada, e constitui turmalinitos maciços e turmalinitos bandados. A turmalina do tipo 3 é grossa, zonada, e desenvolve-se perpendicularmente ao contato entre o turmalinito e os veios e brechas de quartzo e carbonato. Análises por microsonda eletrônica mostram que ocorrem variações composicionais na turmalina dos tipos 1 e 2, relacionadas a teores de $TiO_2 < 0,5\%$ e $TiO_2 > 0,5$. Com o aumento de TiO_2 e CaO, diminuem os teores de SiO_2 e Al_2O_3 e

umentam os de MgO, Na₂O e F. Essas variações também são observadas na turmalina do tipo 3, onde também há enriquecimento em FeO.

As análises de separados de turmalina por ICP-MS mostram que nos tipos 2 e 3, além das concentrações mais elevadas de ETR, há enriquecimento nos teores de ETR leves, Rb, Sr, Y, Cs, Th e U, em relação ao tipo 1. As variações composicionais observadas são coerentes com as condições hidrotermais que se instalaram durante a diagênese e o metamorfismo da Formação Batatal. Não foram encontradas evidências de que fluidos externos (e.g., de origem magmática) tiveram participação na formação da turmalina dos turmalinitos estratiformes. Desta forma, não deve ser descartada totalmente a hipótese de origem singênica dos turmalinitos.

Cavalcanti (2003) propõe dois estágios principais de formação de turmalinas na Mina de Passagem de Mariana. Analogamente, propomos que turmalina do turmalinito (neste trabalho, tipos 1 e 2) originou-se durante a diagênese e o metamorfismo progressivo da fase inicial do Evento Transamazônico. O tipo 3, por desenvolver-se no contato do turmalinito com veios e brechas de quartzo e carbonato, pode ter-se formado durante a fase extensional do Evento Transamazônico, quando também ocorreu a remobilização do ouro em veios e brechas de quartzo/carbonato.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Proc. FAPESP nº 05/56651-3), pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa, e aos revisores que, por meio das sugestões e críticas, contribuíram para a considerável melhoria do texto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, A. L. M.; GROSSI-SAD, J. H.; DORR, J. V. N. The “consanguineous” origin of a tourmaline-bearing gold deposit: passagem de Mariana (Brazil) - discussion. *Economic Geology*, v. 69, p. 416-419, 1974.
- CAVALCANTI, J. A. D.; SCHRANK, A. Controles litoestratigráficos dos turmalinitos auríferos da Serra de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero - MG. *REM: Revista da Escola de Minas*, v. 53, p. 100-109, 1999.
- CAVALCANTI, J. A. D. *Origem dos turmalinitos auríferos da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero-MG: evidências de campo, petrografia, química mineral e dados isotópicos de Nd e Sr*. 2003. 192 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, MG, Brazil. *Geological Survey Professional Paper*, v. 641 A, p. 1-110, 1969.
- DUARTE, B. P. *Contribuição ao estudo da geologia do corpo de minério Fundão do Depósito de Passagem, Mariana, MG*. 1991. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- FLEISCHER, R. *Le gisement aurifère à tourmaline de Passagem de Mariana (Minas Gerais - Brésil) et son cadre. Influence de l'évolution structurale et du métamorphisme sur une minérialisation syngénétique familière*. 1971. 154 f. Tese (Doutorado) - Faculté de Sciences de Paris, Université de Paris, 1971.
- FLEISCHER, R.; ROUTHIER, P. The “consanguineous” origin of a tourmaline-bearing gold deposit: passagem de Mariana (Brazil). *Economic Geology*, v. 68, p. 11-22, 1973.
- GRAUCH, R. I. Rare earth elements in metamorphic rocks. In: LIPIN, B. R.; MCKAY, G. A. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. Washington: Mineralogical Society of America, 1989. p. 147-167. (Reviews in Mineralogy, v. 21).
- GROVES, D. I.; GOLDFARB, R. J.; GEBRE-MARIAM, M.; HAGEMANN, S. G.; ROBERT, F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, v. 13, n. 1-5, p. 7-27, 1998.
- HAWTHORNE, F. C.; HENRY, D. J. Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*, v. 11, p. 201-215, 1999.
- HENRY, D. J.; DUTROW, B. L. Metamorphic tourmaline and its petrogenetic applications. In: GREW, E. S.; ANOVITZ, L. M. (Eds.) *Boron: mineralogy, petrology and geochemistry*. Washington: Mineralogical Society of America, 1996. p. 503-557. (Reviews in Mineralogy, v. 33).
- HENRY, D. J.; GUIDOTTI, C. V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, v. 70, p. 1-15, 1985.
- LADEIRA, E. A. Metalogenia dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: SCHOBBERNHAUS, C.; COELHO, C. E. S. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília: DNPM, 1988. v. 3, p. 301-375.

- LOBATO, L.M.; RIBEIRO-RODRIGUES, L.C.; ZUCCHETTI, M.; NOCE, C.M.; BALTAZAR, O.F.; da SILVA, L.C.; PINTO, C.P. Brazil's premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 228-248, 2001.
- LOBATO, L. M.; VIEIRA, F. W. R.; RIBEIRO-RODRIGUES, L. C.; PEREIRA, L. M. M.; MENEZES, M. G.; JUNQUEIRA, P. A.; PEREIRA, S. L. M. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralizations associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: Part I. description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 3, p. 339-354, 1998.
- MARSCHALL, H. R.; LUDWIG, T.; ALTHERR, R.; KALT, A.; TONARINI, S. Syros metasomatic tourmaline: evidence for very high- $\delta^{11}\text{B}$ fluids in subduction zones. *Journal of Geology*, v. 47, p. 1915-1942, 2006.
- MAXWELL, C. H. The Batatal Formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, v. 7, n. 2, p. 60-61, 1958.
- MOTA, A. A. *A composição da turmalina como indicador petrogenético*. 2006. 42 f. Trabalho de Formatura (Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- NAVARRO, M. S. *A implantação de rotina e seu refinamento para a determinação de elementos terras raras em materiais geológicos por ICP-OES e ICP-MS: aplicação ao caso dos granitóides de Piedade-Ibiuna (SP) e Cunhaporanga (PR)*. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- OLIVEIRA, F. R.; SCHRANK, A.; XAVIER, R. P.; ENDO, I. A mina de ouro de Passagem de Mariana: uma revisão. *REM: Revista da Escola de Minas*, v. 49, n. 1-4, p. 38-43, 1996.
- PESQUERA, A.; TORRES-RUIZ, J.; GIL-CRESPO, P. P.; JIANG, S. Y. Petrographic, chemical, and B-isotopic insights into the origin of tourmaline-rich rocks and boron recycling in the Martinamor Antiform (Central Iberian Zone, Salamanca, Spain). *Journal of Petrology*, v. 46, n. 5, p. 1013-1044, 2005.
- SCHORSCHER, J. H. D. O *Greenstone Belt* Rio das Velhas, no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais... Rio de Janeiro*: SBG, 1984. v. 12, p. 5457-5462.
- SCHORSCHER, J. H. D. *Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos pré-cambrianos do sudeste de Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes*. 1992. 2v. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- SLACK, J. F. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. In: GREW, E. S.; ANOVITZ, L. M. *Boron: mineralogy, petrology and geochemistry*. Washington: Mineralogical Society of America, 1996. p. 559-643. (Reviews in Mineralogy, v. 33).
- SUN, S.; McDONOUGH, W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: SAUNDERS, A. D.; NORRY, M. J. *Magmatism in the ocean basins*. Londres: Geological Society of London, 1989. p. 313-345. (Special Publication, v. 42).
- VIAL, D. S. Mina de Ouro de Passagem de Mariana, Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. *Principais Depósitos Mineraiis do Brasil*. Brasília: DNPM, 1988, v. 3, p. 421-430.
- VIAL, D. S.; DUARTE, B. P.; FUZIKAWA, K.; VIEIRA, M. B. H. An epigenetic origin for the Passagem de Mariana gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 32, n. 3-4, p. 596-613, 2007.

Apêndice 1. Composição química (em peso %) obtida por microsonda eletrônica de turmalina de turmalinitos da Mina da Passagem. Ions calculados na base de 31 átomos de oxigênio e 3 átomos de boro.

| Amostra | MP01-1 | MP01-2 | MP01-3 | MP01-4 | MP01-5 | MP01-6 | MP01-7 | MP01-8 | MP01-9 | MP01-10 | MP01-11 | MP01-12 | MP01-14 | MP01-15 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 37,21 | 36,56 | 36,82 | 36,64 | 37,00 | 36,74 | 36,32 | 36,16 | 36,71 | 36,69 | 36,89 | 36,42 | 36,89 | 36,70 |
| TiO ₂ | 0,21 | 0,78 | 0,69 | 0,60 | 0,28 | 0,71 | 0,36 | 0,78 | 0,40 | 0,42 | 0,35 | 0,57 | 0,66 | 0,64 |
| Al ₂ O ₃ | 33,86 | 32,28 | 32,12 | 32,19 | 33,42 | 32,33 | 33,00 | 31,41 | 32,21 | 32,75 | 33,04 | 32,97 | 32,18 | 32,12 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,05 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,11 | 0,07 | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,02 |
| FeO | 5,46 | 5,40 | 5,85 | 5,37 | 7,06 | 6,12 | 5,91 | 5,92 | 4,46 | 6,24 | 6,12 | 5,71 | 6,45 | 6,67 |
| MnO | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 |
| MgO | 7,15 | 7,49 | 7,72 | 8,07 | 6,61 | 7,56 | 7,03 | 7,58 | 8,56 | 7,26 | 6,73 | 7,39 | 7,65 | 7,80 |
| CaO | 0,30 | 0,62 | 0,62 | 0,63 | 0,25 | 0,55 | 0,44 | 0,65 | 0,54 | 0,45 | 0,24 | 0,58 | 0,88 | 0,76 |
| Na ₂ O | 1,75 | 2,03 | 2,14 | 2,12 | 1,58 | 2,01 | 1,76 | 2,04 | 1,80 | 1,89 | 1,81 | 1,87 | 1,91 | 1,75 |
| K ₂ O | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| F | 0,09 | 0,12 | 0,17 | 0,15 | 0,10 | 0,20 | 0,23 | 0,22 | 0,33 | 0,22 | 0,17 | 0,10 | 0,10 | 0,59 |
| Total | 86,11 | 85,42 | 86,20 | 85,79 | 86,34 | 86,38 | 85,10 | 84,83 | 85,14 | 86,01 | 85,42 | 85,66 | 86,72 | 87,08 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,989 | 5,964 | 5,965 | 5,951 | 5,987 | 5,944 | 5,936 | 5,956 | 5,957 | 5,950 | 6,006 | 5,926 | 5,962 | 5,885 |
| Al _{total} | 6,425 | 6,208 | 6,136 | 6,162 | 6,376 | 6,166 | 6,358 | 6,100 | 6,163 | 6,261 | 6,340 | 6,323 | 6,132 | 6,073 |
| Fe _{total} | 0,735 | 0,737 | 0,793 | 0,730 | 0,955 | 0,827 | 0,807 | 0,815 | 0,605 | 0,846 | 0,833 | 0,777 | 0,871 | 0,894 |
| SiT | 5,989 | 5,964 | 5,965 | 5,951 | 5,987 | 5,944 | 5,936 | 5,956 | 5,957 | 5,950 | 6,000 | 5,926 | 5,962 | 5,885 |
| AlT | 0,011 | 0,036 | 0,035 | 0,049 | 0,013 | 0,056 | 0,064 | 0,044 | 0,043 | 0,050 | 0,000 | 0,074 | 0,038 | 0,115 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 5,958 |
| AlY | 0,414 | 0,172 | 0,101 | 0,113 | 0,362 | 0,110 | 0,294 | 0,056 | 0,120 | 0,211 | 0,340 | 0,249 | 0,094 | 0,000 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,025 | 0,095 | 0,084 | 0,073 | 0,034 | 0,086 | 0,044 | 0,097 | 0,049 | 0,051 | 0,043 | 0,070 | 0,080 | 0,078 |
| Cr | 0,006 | 0,009 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,013 | 0,008 | 0,006 | 0,003 | 0,000 | 0,003 |
| Mg | 1,714 | 1,820 | 1,864 | 1,952 | 1,594 | 1,822 | 1,713 | 1,862 | 2,069 | 1,755 | 1,633 | 1,793 | 1,842 | 1,863 |
| Fe ₂ | 0,735 | 0,737 | 0,793 | 0,730 | 0,955 | 0,827 | 0,807 | 0,815 | 0,605 | 0,846 | 0,833 | 0,777 | 0,871 | 0,853 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,042 |
| Mh | 0,002 | 0,007 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,002 |
| Y_{total} | 2,897 | 2,839 | 2,851 | 2,871 | 2,949 | 2,866 | 2,863 | 2,838 | 2,857 | 2,874 | 2,863 | 2,893 | 2,888 | 2,840 |
| Ca | 0,052 | 0,109 | 0,107 | 0,110 | 0,042 | 0,096 | 0,077 | 0,115 | 0,094 | 0,079 | 0,043 | 0,102 | 0,152 | 0,131 |
| Na | 0,545 | 0,641 | 0,672 | 0,668 | 0,494 | 0,631 | 0,558 | 0,650 | 0,567 | 0,595 | 0,572 | 0,589 | 0,598 | 0,544 |
| K | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,000 | 0,006 | 0,005 | 0,002 | 0,002 | 0,007 | 0,005 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| Total Cations | 15,499 | 15,594 | 15,632 | 15,649 | 15,491 | 15,597 | 15,501 | 15,605 | 15,525 | 15,552 | 15,478 | 15,586 | 15,640 | 15,476 |
| Mg# | 0,700 | 0,712 | 0,702 | 0,728 | 0,625 | 0,688 | 0,680 | 0,696 | 0,774 | 0,675 | 0,662 | 0,698 | 0,679 | 0,676 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP8B-1 | MP8B-2 | MP8B-3nv | MP8B-3bm | MP8B-4nv | MP8B-4bm | MP8B-5nv | MP8B-5bm | MP8B-6nv | MP8B-6bm |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,49 | 36,65 | 36,76 | 36,84 | 36,68 | 36,41 | 36,87 | 36,65 | 36,89 | 36,72 |
| TiO ₂ | 0,87 | 0,28 | 0,28 | 0,59 | 0,17 | 0,59 | 0,21 | 0,71 | 0,17 | 0,66 |
| Al ₂ O ₃ | 32,24 | 33,64 | 34,01 | 33,51 | 34,00 | 33,42 | 34,26 | 33,19 | 33,10 | 32,48 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,10 | 0,13 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,12 | 0,22 | 0,22 | 0,47 | 0,66 |
| FeO | 5,94 | 5,95 | 6,04 | 5,64 | 5,95 | 5,53 | 6,48 | 5,59 | 4,99 | 4,97 |
| MnO | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,02 |
| MgO | 7,86 | 7,01 | 6,80 | 7,42 | 7,08 | 7,38 | 6,97 | 7,27 | 7,46 | 7,66 |
| CaO | 1,44 | 0,67 | 0,59 | 0,94 | 0,50 | 0,90 | 0,57 | 0,96 | 0,50 | 1,02 |
| Na ₂ O | 1,76 | 1,65 | 1,60 | 1,69 | 1,49 | 1,70 | 1,55 | 1,74 | 1,66 | 1,69 |
| K ₂ O | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| F | 0,11 | 0,08 | 0,06 | 0,14 | 0,11 | 0,04 | 0,02 | 0,14 | 0,05 | 0,00 |
| Total | 86,86 | 86,09 | 86,37 | 86,92 | 86,23 | 86,13 | 87,16 | 86,47 | 85,34 | 85,88 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,892 | 5,930 | 5,929 | 5,904 | 5,916 | 5,893 | 5,908 | 5,908 | 5,996 | 5,957 |
| Al _{total} | 6,137 | 6,418 | 6,467 | 6,331 | 6,466 | 6,377 | 6,473 | 6,307 | 6,342 | 6,213 |
| Fe _{total} | 0,803 | 0,805 | 0,815 | 0,756 | 0,803 | 0,748 | 0,868 | 0,754 | 0,678 | 0,674 |
| SiT | 5,892 | 5,930 | 5,929 | 5,904 | 5,916 | 5,893 | 5,908 | 5,908 | 5,996 | 5,957 |
| AlT | 0,108 | 0,070 | 0,071 | 0,096 | 0,084 | 0,107 | 0,092 | 0,092 | 0,004 | 0,043 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,029 | 0,348 | 0,396 | 0,235 | 0,382 | 0,270 | 0,381 | 0,215 | 0,338 | 0,171 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,105 | 0,034 | 0,034 | 0,071 | 0,021 | 0,071 | 0,025 | 0,086 | 0,021 | 0,080 |
| Cr | 0,013 | 0,017 | 0,023 | 0,021 | 0,024 | 0,015 | 0,028 | 0,028 | 0,060 | 0,084 |
| Mg | 1,892 | 1,690 | 1,635 | 1,771 | 1,702 | 1,781 | 1,664 | 1,746 | 1,807 | 1,851 |
| Fe ₂ | 0,803 | 0,805 | 0,815 | 0,756 | 0,803 | 0,748 | 0,868 | 0,754 | 0,678 | 0,674 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,008 | 0,005 | 0,001 | 0,000 | 0,006 | 0,002 |
| Y_{total} | 2,845 | 2,897 | 2,905 | 2,854 | 2,939 | 2,891 | 2,967 | 2,828 | 2,909 | 2,862 |
| Ca | 0,250 | 0,116 | 0,101 | 0,161 | 0,087 | 0,157 | 0,097 | 0,165 | 0,087 | 0,178 |
| Na | 0,552 | 0,519 | 0,502 | 0,525 | 0,467 | 0,532 | 0,481 | 0,543 | 0,524 | 0,532 |
| K | 0,005 | 0,003 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,002 | 0,003 |
| Total Cations | 15,651 | 15,534 | 15,515 | 15,540 | 15,493 | 15,581 | 15,549 | 15,540 | 15,523 | 15,576 |
| Mg# | 0,702 | 0,677 | 0,667 | 0,701 | 0,679 | 0,704 | 0,657 | 0,698 | 0,727 | 0,733 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP8B-7nv | MP8B-7bm | MP8B-8nv | MP8B-8bm | MP8B-9nv | MP8B-9bm | MP8B-10 | MP11-1 | MP11-2 | MP11-3 | MP11-4 | MP11-5 | MP11-6 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,85 | 36,05 | 37,16 | 36,93 | 36,60 | 36,61 | 36,12 | 37,36 | 37,08 | 36,79 | 36,75 | 37,65 | 36,70 |
| TiO ₂ | 0,32 | 0,60 | 0,19 | 0,37 | 0,10 | 0,66 | 0,75 | 0,54 | 0,28 | 0,57 | 0,66 | 0,36 | 0,80 |
| Al ₂ O ₃ | 34,01 | 32,87 | 33,84 | 33,56 | 33,42 | 33,41 | 33,24 | 32,81 | 32,94 | 31,91 | 32,48 | 33,23 | 31,84 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,20 | 0,26 | 0,16 | 0,22 | 0,12 | 0,05 | 0,30 | 0,00 | 0,06 | 0,03 | 0,07 | 0,06 | 0,04 |
| FeO | 5,92 | 5,84 | 5,99 | 6,20 | 5,87 | 6,20 | 5,75 | 5,35 | 5,14 | 5,69 | 5,11 | 5,06 | 5,96 |
| MnO | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,00 |
| MgO | 6,98 | 7,06 | 7,04 | 6,94 | 7,10 | 7,36 | 7,40 | 8,32 | 7,88 | 8,69 | 8,18 | 7,86 | 8,04 |
| CaO | 0,48 | 0,83 | 0,47 | 0,69 | 0,47 | 1,07 | 0,98 | 0,60 | 0,31 | 0,88 | 0,60 | 0,27 | 0,74 |
| Na ₂ O | 1,64 | 1,69 | 1,59 | 1,63 | 1,56 | 1,75 | 1,76 | 2,21 | 2,05 | 1,97 | 2,07 | 1,95 | 2,04 |
| K ₂ O | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| F | 0,03 | 0,02 | 0,12 | 0,11 | 0,02 | 0,12 | 0,12 | 0,10 | 0,14 | 0,39 | 0,08 | 0,19 | 0,23 |
| Total | 86,46 | 85,25 | 86,57 | 86,65 | 85,27 | 87,24 | 86,50 | 87,34 | 85,90 | 86,99 | 86,04 | 86,67 | 86,40 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,933 | 5,910 | 5,965 | 5,944 | 5,972 | 5,873 | 5,839 | 5,960 | 5,987 | 5,900 | 5,947 | 6,012 | 5,938 |
| Al _{total} | 6,457 | 6,353 | 6,404 | 6,367 | 6,429 | 6,318 | 6,333 | 6,170 | 6,272 | 6,034 | 6,196 | 6,256 | 6,074 |
| Fe _{total} | 0,797 | 0,800 | 0,804 | 0,835 | 0,801 | 0,832 | 0,778 | 0,714 | 0,694 | 0,763 | 0,692 | 0,676 | 0,806 |
| SiT | 5,933 | 5,910 | 5,965 | 5,944 | 5,972 | 5,873 | 5,839 | 5,960 | 5,987 | 5,900 | 5,947 | 6,000 | 5,938 |
| AlT | 0,067 | 0,090 | 0,035 | 0,056 | 0,028 | 0,127 | 0,161 | 0,040 | 0,013 | 0,100 | 0,053 | 0,000 | 0,062 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,390 | 0,263 | 0,370 | 0,311 | 0,401 | 0,191 | 0,172 | 0,130 | 0,259 | 0,000 | 0,143 | 0,256 | 0,012 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,000 |
| Ti | 0,038 | 0,073 | 0,023 | 0,045 | 0,012 | 0,079 | 0,091 | 0,065 | 0,034 | 0,069 | 0,080 | 0,043 | 0,097 |
| Cr | 0,025 | 0,034 | 0,020 | 0,027 | 0,015 | 0,006 | 0,039 | 0,000 | 0,008 | 0,003 | 0,009 | 0,007 | 0,006 |
| Mg | 1,675 | 1,725 | 1,683 | 1,663 | 1,725 | 1,759 | 1,783 | 1,978 | 1,896 | 2,078 | 1,973 | 1,870 | 1,939 |
| Fe ₂ | 0,797 | 0,800 | 0,804 | 0,835 | 0,801 | 0,832 | 0,778 | 0,000 | 0,000 | 0,698 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,714 | 0,694 | 0,065 | 0,692 | 0,676 | 0,806 |
| Mn | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,002 | 0,005 | 0,000 |
| Y _{total} | 2,926 | 2,897 | 2,903 | 2,883 | 2,954 | 2,869 | 2,868 | 2,890 | 2,892 | 2,916 | 2,899 | 2,869 | 2,860 |
| Ca | 0,082 | 0,146 | 0,081 | 0,120 | 0,082 | 0,184 | 0,170 | 0,103 | 0,054 | 0,152 | 0,104 | 0,046 | 0,128 |
| Na | 0,512 | 0,536 | 0,495 | 0,507 | 0,492 | 0,544 | 0,553 | 0,683 | 0,643 | 0,612 | 0,650 | 0,605 | 0,640 |
| K | 0,007 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,005 | 0,002 | 0,007 | 0,007 | 0,002 | 0,010 | 0,005 | 0,002 | 0,003 |
| Total Cations | 15,527 | 15,585 | 15,480 | 15,511 | 15,533 | 15,599 | 15,597 | 15,682 | 15,591 | 15,625 | 15,657 | 15,522 | 15,630 |
| Mg# | 0,678 | 0,683 | 0,677 | 0,666 | 0,683 | 0,679 | 0,696 | 0,735 | 0,732 | 0,731 | 0,740 | 0,735 | 0,706 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP11-7 | MP11-8 | MP11-9 | MP11-10 | MP11-11 | MP11-12h | MP11-12be | MP11-13 | MP11-16 | MP11-17 | MP11-18 | MP14-1 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,73 | 36,53 | 37,05 | 37,46 | 36,92 | 37,15 | 37,42 | 36,76 | 36,44 | 37,22 | 36,57 | 36,30 |
| TiO ₂ | 0,69 | 0,60 | 0,54 | 0,24 | 0,32 | 0,29 | 0,28 | 0,71 | 0,65 | 0,20 | 0,70 | 0,18 |
| Al ₂ O ₃ | 31,96 | 31,47 | 32,34 | 33,69 | 33,44 | 32,93 | 33,18 | 32,81 | 32,32 | 33,62 | 32,26 | 33,67 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,07 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,08 | 0,00 |
| FeO | 5,60 | 5,84 | 5,30 | 5,84 | 5,80 | 5,48 | 5,17 | 5,39 | 5,79 | 5,16 | 5,73 | 6,11 |
| MnO | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| MgO | 8,20 | 7,99 | 8,75 | 7,44 | 7,78 | 7,99 | 7,77 | 8,03 | 8,20 | 7,91 | 8,04 | 6,95 |
| CaO | 0,66 | 0,58 | 0,69 | 0,23 | 0,25 | 0,37 | 0,30 | 0,64 | 0,57 | 0,27 | 0,91 | 0,48 |
| Na ₂ O | 2,13 | 2,03 | 1,97 | 1,91 | 1,98 | 1,98 | 1,93 | 2,13 | 2,30 | 2,02 | 1,85 | 1,61 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| F | 0,05 | 0,20 | 0,03 | 0,32 | 0,19 | 0,03 | 0,04 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,27 | 0,08 |
| Total | 86,09 | 85,31 | 86,72 | 87,18 | 86,75 | 86,28 | 86,12 | 86,67 | 86,46 | 86,57 | 86,43 | 85,38 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,961 | 5,978 | 5,958 | 5,960 | 5,921 | 5,991 | 6,024 | 5,913 | 5,897 | 5,959 | 5,903 | 5,921 |
| Al _{total} | 6,115 | 6,071 | 6,130 | 6,319 | 6,323 | 6,261 | 6,297 | 6,222 | 6,166 | 6,346 | 6,139 | 6,474 |
| Fe _{total} | 0,760 | 0,800 | 0,713 | 0,777 | 0,778 | 0,739 | 0,695 | 0,725 | 0,784 | 0,691 | 0,774 | 0,834 |
| SiT | 5,961 | 5,978 | 5,958 | 5,960 | 5,921 | 5,991 | 6,000 | 5,913 | 5,897 | 5,959 | 5,903 | 5,921 |
| AlT | 0,039 | 0,022 | 0,042 | 0,040 | 0,079 | 0,009 | 0,000 | 0,087 | 0,103 | 0,041 | 0,097 | 0,079 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,077 | 0,049 | 0,088 | 0,279 | 0,244 | 0,252 | 0,297 | 0,135 | 0,063 | 0,305 | 0,041 | 0,396 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,024 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,084 | 0,074 | 0,066 | 0,028 | 0,039 | 0,035 | 0,033 | 0,086 | 0,079 | 0,024 | 0,084 | 0,022 |
| Cr | 0,009 | 0,002 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,004 | 0,004 | 0,002 | 0,010 | 0,000 |
| Mg | 1,984 | 1,950 | 2,096 | 1,765 | 1,860 | 1,920 | 1,865 | 1,925 | 1,978 | 1,888 | 1,935 | 1,690 |
| Fe ₂ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,834 |
| Fe ₃ | 0,760 | 0,800 | 0,713 | 0,777 | 0,778 | 0,739 | 0,695 | 0,725 | 0,784 | 0,691 | 0,774 | 0,000 |
| Mn | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,004 | 0,006 | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| Y_{total} | 2,914 | 2,878 | 2,965 | 2,854 | 2,927 | 2,953 | 2,916 | 2,879 | 2,911 | 2,911 | 2,845 | 2,942 |
| Ca | 0,114 | 0,102 | 0,119 | 0,040 | 0,044 | 0,064 | 0,051 | 0,110 | 0,099 | 0,045 | 0,157 | 0,084 |
| Na | 0,669 | 0,644 | 0,614 | 0,590 | 0,615 | 0,619 | 0,602 | 0,664 | 0,720 | 0,628 | 0,580 | 0,509 |
| K | 0,001 | 0,004 | 0,007 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,001 |
| Total Cations | 15,699 | 15,628 | 15,705 | 15,486 | 15,589 | 15,640 | 15,573 | 15,657 | 15,732 | 15,588 | 15,587 | 15,536 |
| Mg# | 0,723 | 0,709 | 0,746 | 0,694 | 0,705 | 0,722 | 0,728 | 0,726 | 0,716 | 0,732 | 0,714 | 0,670 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP14-2 | MP14-3 | MP14-4 | MP14-5a | MP14-5b | MP14-6a | MP14-6b | MP14-6i | MP14-7a | MP14-7b | MP14-8 | MP14-9a |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,43 | 36,22 | 36,93 | 36,64 | 35,99 | 36,82 | 36,34 | 37,05 | 37,11 | 36,33 | 36,63 | 37,12 |
| TiO ₂ | 0,31 | 0,73 | 0,20 | 0,57 | 0,74 | 0,15 | 0,58 | 0,59 | 0,19 | 0,71 | 0,52 | 0,57 |
| Al ₂ O ₃ | 33,65 | 31,74 | 33,61 | 33,12 | 33,65 | 34,19 | 33,29 | 32,87 | 34,11 | 33,73 | 33,31 | 33,76 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 0,04 | 0,09 | 0,03 |
| FeO | 5,57 | 6,97 | 6,44 | 6,27 | 6,44 | 6,47 | 5,35 | 5,51 | 6,18 | 5,28 | 4,65 | 6,06 |
| MnO | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,08 |
| MgO | 7,02 | 7,30 | 6,98 | 7,47 | 7,40 | 6,90 | 7,73 | 7,93 | 6,77 | 7,60 | 8,13 | 7,31 |
| CaO | 0,36 | 1,11 | 0,43 | 0,75 | 1,00 | 0,48 | 1,04 | 0,43 | 0,41 | 1,12 | 0,48 | 0,73 |
| Na ₂ O | 1,58 | 1,67 | 1,57 | 1,97 | 1,74 | 1,53 | 1,71 | 2,03 | 1,65 | 1,72 | 2,07 | 1,64 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |
| F | 0,10 | 0,11 | 0,05 | 0,15 | 0,15 | 0,01 | 0,18 | 0,13 | 0,14 | 0,13 | 0,31 | 0,07 |
| Total | 85,02 | 85,86 | 86,23 | 86,96 | 87,16 | 86,62 | 86,27 | 86,64 | 86,62 | 86,71 | 86,20 | 87,39 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,942 | 5,935 | 5,970 | 5,894 | 5,791 | 5,930 | 5,865 | 5,952 | 5,957 | 5,838 | 5,883 | 5,926 |
| Al _{total} | 6,471 | 6,130 | 6,407 | 6,281 | 6,382 | 6,492 | 6,335 | 6,226 | 6,456 | 6,389 | 6,307 | 6,354 |
| Fe _{total} | 0,760 | 0,955 | 0,870 | 0,844 | 0,867 | 0,872 | 0,722 | 0,740 | 0,830 | 0,710 | 0,625 | 0,809 |
| SiT | 5,942 | 5,935 | 5,970 | 5,894 | 5,791 | 5,930 | 5,865 | 5,952 | 5,957 | 5,838 | 5,883 | 5,926 |
| AlT | 0,058 | 0,065 | 0,030 | 0,106 | 0,209 | 0,070 | 0,135 | 0,048 | 0,043 | 0,162 | 0,117 | 0,074 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,414 | 0,065 | 0,377 | 0,175 | 0,173 | 0,422 | 0,200 | 0,178 | 0,413 | 0,227 | 0,190 | 0,280 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,038 | 0,090 | 0,024 | 0,068 | 0,089 | 0,019 | 0,070 | 0,072 | 0,023 | 0,085 | 0,063 | 0,068 |
| Cr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,010 | 0,001 | 0,005 | 0,011 | 0,004 |
| Mg | 1,706 | 1,783 | 1,682 | 1,791 | 1,774 | 1,655 | 1,860 | 1,899 | 1,619 | 1,821 | 1,946 | 1,738 |
| Fe ₂ | 0,760 | 0,955 | 0,870 | 0,844 | 0,867 | 0,872 | 0,722 | 0,740 | 0,830 | 0,710 | 0,625 | 0,809 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 0,006 | 0,001 | 0,011 |
| Y_{total} | 2,918 | 2,893 | 2,958 | 2,881 | 2,906 | 2,974 | 2,854 | 2,900 | 2,893 | 2,853 | 2,836 | 2,910 |
| Ca | 0,063 | 0,195 | 0,074 | 0,129 | 0,172 | 0,084 | 0,180 | 0,075 | 0,071 | 0,193 | 0,082 | 0,125 |
| Na | 0,500 | 0,530 | 0,493 | 0,613 | 0,542 | 0,479 | 0,536 | 0,632 | 0,512 | 0,535 | 0,643 | 0,507 |
| K | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,005 | 0,006 | 0,000 | 0,005 | 0,004 | 0,000 | 0,003 | 0,001 | 0,006 |
| Total Cations | 15,482 | 15,619 | 15,525 | 15,627 | 15,625 | 15,537 | 15,575 | 15,610 | 15,477 | 15,584 | 15,563 | 15,548 |
| Mg# | 0,692 | 0,651 | 0,659 | 0,680 | 0,672 | 0,655 | 0,720 | 0,720 | 0,661 | 0,719 | 0,757 | 0,682 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP14-9b | MP14-11 | MP14-12 | MP14-13 | MP14-14 | MP14-15 | MP14-16 | MP14-17 | MP14-18 | MP14-19 | MP14-21 | MP14-22 | MP14-23 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,96 | 37,00 | 37,08 | 36,50 | 37,11 | 37,26 | 36,56 | 37,01 | 36,98 | 36,89 | 36,37 | 36,67 | 36,83 |
| TiO ₂ | 0,50 | 0,19 | 0,20 | 0,70 | 0,16 | 0,16 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,15 | 0,57 | 0,72 | 0,19 |
| Al ₂ O ₃ | 32,77 | 34,02 | 34,06 | 32,41 | 33,52 | 33,99 | 34,05 | 34,12 | 33,58 | 33,94 | 33,13 | 32,41 | 33,93 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,08 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| FeO | 5,82 | 5,92 | 6,09 | 6,14 | 6,13 | 5,79 | 6,14 | 5,89 | 5,87 | 6,55 | 5,45 | 5,77 | 5,72 |
| MnO | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| MgO | 7,58 | 7,47 | 7,04 | 8,15 | 6,99 | 7,09 | 7,05 | 7,04 | 7,27 | 6,85 | 7,78 | 7,93 | 7,09 |
| CaO | 0,53 | 0,51 | 0,36 | 1,50 | 0,42 | 0,37 | 0,43 | 0,37 | 0,40 | 0,44 | 0,88 | 1,79 | 0,43 |
| Na ₂ O | 2,02 | 1,62 | 1,68 | 1,68 | 1,60 | 1,57 | 1,57 | 1,66 | 1,50 | 1,63 | 1,72 | 1,44 | 1,59 |
| K ₂ O | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,00 |
| F | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,13 | 0,17 | 0,06 | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,17 | 0,11 | 0,18 | 0,06 |
| Total | 86,34 | 86,76 | 86,57 | 87,27 | 86,16 | 86,37 | 86,01 | 86,39 | 85,89 | 86,67 | 86,03 | 86,93 | 85,86 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,975 | 5,937 | 5,961 | 5,870 | 5,985 | 5,987 | 5,921 | 5,956 | 5,983 | 5,933 | 5,889 | 5,900 | 5,956 |
| Al _{total} | 6,245 | 6,436 | 6,456 | 6,145 | 6,374 | 6,439 | 6,502 | 6,474 | 6,404 | 6,435 | 6,325 | 6,147 | 6,468 |
| Fe _{total} | 0,786 | 0,794 | 0,819 | 0,826 | 0,827 | 0,777 | 0,832 | 0,793 | 0,794 | 0,881 | 0,737 | 0,776 | 0,773 |
| SiT | 5,975 | 5,937 | 5,961 | 5,870 | 5,985 | 5,987 | 5,921 | 5,956 | 5,983 | 5,933 | 5,889 | 5,900 | 5,956 |
| AlT | 0,025 | 0,063 | 0,039 | 0,130 | 0,015 | 0,013 | 0,079 | 0,044 | 0,017 | 0,067 | 0,111 | 0,100 | 0,044 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,220 | 0,373 | 0,416 | 0,015 | 0,359 | 0,426 | 0,423 | 0,430 | 0,387 | 0,368 | 0,213 | 0,047 | 0,423 |
| SiY | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,061 | 0,023 | 0,024 | 0,085 | 0,019 | 0,019 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,018 | 0,070 | 0,087 | 0,024 |
| Cr | 0,010 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,001 | 0,006 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 |
| Mg | 1,826 | 1,787 | 1,688 | 1,952 | 1,680 | 1,699 | 1,701 | 1,689 | 1,752 | 1,642 | 1,877 | 1,902 | 1,708 |
| Fe ₂ | 0,786 | 0,794 | 0,819 | 0,826 | 0,827 | 0,777 | 0,832 | 0,793 | 0,794 | 0,881 | 0,737 | 0,776 | 0,773 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,004 | 0,002 | 0,000 | 0,007 | 0,001 | 0,007 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,002 |
| Y_{total} | 2,908 | 2,979 | 2,950 | 2,887 | 2,890 | 2,929 | 2,981 | 2,942 | 2,961 | 2,913 | 2,899 | 2,812 | 2,929 |
| Ca | 0,092 | 0,088 | 0,062 | 0,258 | 0,072 | 0,064 | 0,075 | 0,064 | 0,070 | 0,076 | 0,152 | 0,309 | 0,075 |
| Na | 0,633 | 0,505 | 0,523 | 0,523 | 0,502 | 0,489 | 0,492 | 0,519 | 0,469 | 0,509 | 0,539 | 0,449 | 0,500 |
| K | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,005 | 0,001 |
| Total Cations | 15,638 | 15,574 | 15,539 | 15,668 | 15,468 | 15,487 | 15,548 | 15,529 | 15,503 | 15,501 | 15,591 | 15,574 | 15,505 |
| Mg# | 0,699 | 0,692 | 0,673 | 0,703 | 0,670 | 0,686 | 0,672 | 0,681 | 0,688 | 0,651 | 0,718 | 0,710 | 0,688 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP14-24 | MP14-25 | MP14-26 | MP16-1 | MP16-2 | MP16-3 | MP16-4 | MP16-5 | MP16-6 | MP16-12 | MP16-13 | MP18-1 | MP18-2 | MP18-3 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SiO ₂ | 36,72 | 37,10 | 36,52 | 36,76 | 37,40 | 36,68 | 36,27 | 36,65 | 36,40 | 36,59 | 36,60 | 38,05 | 37,23 | 37,24 |
| TiO ₂ | 0,21 | 0,21 | 0,25 | 0,79 | 0,36 | 0,80 | 0,63 | 0,65 | 0,67 | 0,33 | 0,62 | 0,27 | 0,29 | 0,17 |
| Al ₂ O ₃ | 33,90 | 33,70 | 33,87 | 32,64 | 33,36 | 32,81 | 32,82 | 33,08 | 33,06 | 33,52 | 32,59 | 35,46 | 34,02 | 34,06 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,05 | n.d. | n.d. | n.d. |
| FeO | 6,15 | 6,42 | 7,18 | 6,18 | 5,75 | 5,69 | 5,83 | 5,69 | 6,16 | 5,68 | 5,39 | 5,73 | 5,51 | 5,37 |
| MnO | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| MgO | 6,77 | 6,69 | 6,37 | 7,69 | 7,68 | 7,79 | 7,71 | 7,60 | 7,56 | 7,07 | 8,01 | 7,45 | 7,54 | 7,18 |
| CaO | 0,39 | 0,36 | 0,40 | 0,99 | 0,31 | 1,45 | 1,00 | 0,82 | 0,84 | 0,53 | 0,69 | 0,50 | 0,62 | 0,54 |
| Na ₂ O | 1,73 | 1,62 | 1,58 | 1,79 | 1,98 | 1,57 | 1,87 | 1,85 | 1,98 | 1,67 | 1,92 | 1,80 | 1,69 | 1,55 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| F | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,33 | 0,15 | 0,07 | 0,10 | 0,06 | 0,08 | 0,00 | 0,14 | 0,06 | 0,10 | 0,05 |
| Total | 85,98 | 86,13 | 86,23 | 87,21 | 87,01 | 86,93 | 86,26 | 86,43 | 86,82 | 85,47 | 86,04 | 89,37 | 87,04 | 86,20 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,952 | 6,002 | 5,927 | 5,887 | 5,975 | 5,900 | 5,880 | 5,917 | 5,873 | 5,954 | 5,925 | 5,915 | 5,940 | 5,986 |
| Al _{total} | 6,478 | 6,427 | 6,481 | 6,163 | 6,283 | 6,222 | 6,272 | 6,296 | 6,288 | 6,432 | 6,219 | 6,499 | 6,399 | 6,454 |
| Fe _{total} | 0,834 | 0,868 | 0,974 | 0,828 | 0,769 | 0,765 | 0,790 | 0,769 | 0,830 | 0,773 | 0,730 | 0,745 | 0,735 | 0,722 |
| SiT | 5,952 | 6,000 | 5,927 | 5,887 | 5,975 | 5,900 | 5,880 | 5,917 | 5,873 | 5,954 | 5,925 | 5,915 | 5,940 | 5,986 |
| AlT | 0,048 | 0,000 | 0,073 | 0,113 | 0,025 | 0,100 | 0,120 | 0,083 | 0,127 | 0,046 | 0,075 | 0,085 | 0,060 | 0,014 |
| AlZ | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| AlY | 0,430 | 0,427 | 0,408 | 0,050 | 0,259 | 0,122 | 0,152 | 0,213 | 0,161 | 0,386 | 0,144 | 0,413 | 0,340 | 0,440 |
| SiY | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,025 | 0,026 | 0,031 | 0,095 | 0,043 | 0,096 | 0,077 | 0,079 | 0,081 | 0,040 | 0,075 | 0,032 | 0,035 | 0,021 |
| Cr | 0,009 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,009 | 0,007 | n.d. | n.d. | n.d. |
| Mg | 1,636 | 1,613 | 1,541 | 1,836 | 1,828 | 1,867 | 1,863 | 1,828 | 1,816 | 1,714 | 1,932 | 1,727 | 1,793 | 1,719 |
| Fe ₂ | 0,834 | 0,868 | 0,974 | 0,828 | 0,769 | 0,765 | 0,790 | 0,769 | 0,830 | 0,773 | 0,730 | 0,745 | 0,735 | 0,722 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,005 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,005 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| Y_{total} | 2,939 | 2,938 | 2,956 | 2,813 | 2,902 | 2,856 | 2,886 | 2,893 | 2,895 | 2,924 | 2,892 | 2,918 | 2,903 | 2,904 |
| Ca | 0,068 | 0,063 | 0,070 | 0,170 | 0,053 | 0,250 | 0,173 | 0,142 | 0,146 | 0,092 | 0,120 | 0,083 | 0,107 | 0,092 |
| Na | 0,542 | 0,508 | 0,496 | 0,555 | 0,612 | 0,491 | 0,588 | 0,579 | 0,620 | 0,528 | 0,601 | 0,543 | 0,524 | 0,482 |
| K | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,007 | 0,003 | 0,006 |
| Total Cations | 15,552 | 15,510 | 15,523 | 15,539 | 15,566 | 15,604 | 15,647 | 15,615 | 15,665 | 15,545 | 15,615 | 15,551 | 15,537 | 15,484 |
| Mg# | 0,662 | 0,650 | 0,613 | 0,689 | 0,704 | 0,709 | 0,702 | 0,704 | 0,686 | 0,689 | 0,726 | 0,699 | 0,709 | 0,704 |

(continua...)

Apêndice 1. (continuação...)

| Amostra | MP18-4 | MP18-5 | MP18-6 | MP18-7 | MP18-8 | MP18-9 | MP18-10 | MP18-11 | MP18-12 | MP18-13 | MP18-14 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SiO ₂ | 36,56 | 37,17 | 36,26 | 36,52 | 36,19 | 36,80 | 36,00 | 37,11 | 36,52 | 36,19 | 34,36 |
| TiO ₂ | 0,52 | 0,22 | 0,46 | 0,67 | 0,71 | 0,13 | 0,68 | 0,28 | 0,21 | 0,42 | 1,00 |
| Al ₂ O ₃ | 33,67 | 33,94 | 33,74 | 32,87 | 32,65 | 33,42 | 32,75 | 33,08 | 34,06 | 33,78 | 32,22 |
| Cr ₂ O ₃ | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| FeO | 5,76 | 5,73 | 5,38 | 5,41 | 5,95 | 5,58 | 5,48 | 4,96 | 5,56 | 5,32 | 5,73 |
| MnO | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| MgO | 7,13 | 7,33 | 7,47 | 7,39 | 7,56 | 7,09 | 7,25 | 7,79 | 7,32 | 7,19 | 7,59 |
| CaO | 1,01 | 0,59 | 0,86 | 0,96 | 0,83 | 0,41 | 1,01 | 0,41 | 0,56 | 0,69 | 1,20 |
| Na ₂ O | 1,77 | 1,59 | 1,76 | 1,78 | 1,87 | 1,53 | 1,61 | 1,89 | 1,68 | 1,53 | 1,63 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| F | 0,07 | 0,17 | 0,20 | 0,09 | 0,25 | 0,01 | 0,07 | 0,13 | 0,21 | 0,14 | 0,17 |
| Total | 86,53 | 86,76 | 86,15 | 85,70 | 86,04 | 85,02 | 84,88 | 85,70 | 86,15 | 85,25 | 83,92 |
| B | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 | 3,000 |
| Si _{total} | 5,896 | 5,946 | 5,853 | 5,936 | 5,875 | 6,005 | 5,911 | 5,997 | 5,884 | 5,887 | 5,737 |
| Al _{total} | 6,401 | 6,400 | 6,420 | 6,297 | 6,247 | 6,429 | 6,339 | 6,303 | 6,469 | 6,479 | 6,343 |
| Fe _{total} | 0,777 | 0,767 | 0,726 | 0,735 | 0,807 | 0,761 | 0,752 | 0,670 | 0,750 | 0,724 | 0,801 |
| Sr | 5,896 | 5,946 | 5,853 | 5,936 | 5,875 | 6,000 | 5,911 | 5,997 | 5,884 | 5,887 | 5,737 |
| Al | 0,104 | 0,054 | 0,147 | 0,064 | 0,125 | 0,000 | 0,089 | 0,003 | 0,116 | 0,113 | 0,263 |
| Al _Z | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| Al _Y | 0,297 | 0,346 | 0,273 | 0,233 | 0,122 | 0,429 | 0,250 | 0,299 | 0,353 | 0,367 | 0,080 |
| Si _Y | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Ti | 0,062 | 0,026 | 0,056 | 0,082 | 0,087 | 0,016 | 0,083 | 0,034 | 0,025 | 0,051 | 0,125 |
| Cr | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| Mg | 1,713 | 1,748 | 1,797 | 1,789 | 1,828 | 1,725 | 1,774 | 1,877 | 1,758 | 1,743 | 1,889 |
| Fe ₂ | 0,777 | 0,767 | 0,726 | 0,735 | 0,807 | 0,761 | 0,752 | 0,670 | 0,750 | 0,724 | 0,801 |
| Fe ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Mn | 0,004 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,003 |
| Y_{total} | 2,853 | 2,890 | 2,852 | 2,839 | 2,845 | 2,942 | 2,863 | 2,885 | 2,889 | 2,885 | 2,898 |
| Ca | 0,175 | 0,100 | 0,149 | 0,167 | 0,145 | 0,071 | 0,177 | 0,071 | 0,096 | 0,120 | 0,214 |
| Na | 0,553 | 0,494 | 0,552 | 0,562 | 0,588 | 0,483 | 0,511 | 0,592 | 0,526 | 0,481 | 0,529 |
| K | 0,002 | 0,000 | 0,005 | 0,003 | 0,006 | 0,003 | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |
| Total Cations | 15,583 | 15,484 | 15,557 | 15,570 | 15,584 | 15,500 | 15,555 | 15,550 | 15,514 | 15,487 | 15,641 |
| Mg# | 0,688 | 0,695 | 0,712 | 0,709 | 0,694 | 0,694 | 0,702 | 0,737 | 0,701 | 0,707 | 0,702 |