

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AS ROCHAS VULCÂNICAS ÁCIDAS CRETÁCEAS
DA BACIA DO PARANÁ, REGIÃO DE
PIRAJU-OURINHOS (SP): PETROGRAFIA,
QUÍMICA MINERAL E QUÍMICA DE ROCHAS.**

Fernanda Amaral Dantas

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2003/27)

SÃO PAULO
2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900014490

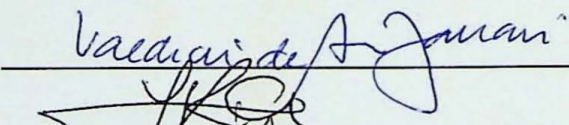

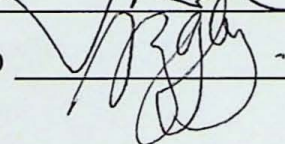


**AS ROCHAS VULCÂNICAS ÁCIDAS CRETÁCEAS NA
BACIA DO PARANÁ, REGIÃO DE PIRAJU-
OURINHOS (SP): PETROGRAFIA, QUÍMICA
MINERAL E DE ROCHAS**

FERNANDA AMARAL DANTAS

Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi 
Prof. Dr. Francisco Rubens Alves 
Prof. Dr. Gergely Andres Julio Szabó 

São Paulo

2003

TF
D192
FA.M

DOAÇÃO	Seção
Graduação - IGr	
Data: 06/05/2004	

1	16.1-17.27	1
2	18.1-24	2
3	19.1-29	3
4	20.1-30	4
5	21.1-30	5
6	22.1-27	6
7	23.1-35	7
8	24.1-34	8
9	25.1-32	9
10	26.1-28	10
11	27.1-30	11
12	28.1-28	12
13	29.1-27	13
14	30.1-33	14
15	31.1-31	15
16	32.1-9	16
17	33.1-9	17
18	34.1-35	18
19	35.1-12	19
20	36.1-19	20
21	37.1-39	21
22	38.1-38	22
23	39.1-17	23
24	40.1-30	24
25	41.1-10	25
26	42.1-25	26
27	43.1-34	27
28	44.1-19	28
29	45.1-28	29
30	46.1-28	30
31	47.1-27	31
32	48.1-27	32
33	49.1-21	33
34	50.1-23	34
35	51.1-10	35
36	52.1-9	36
37	53.1-12	37
38	54.1-28	38
39	55.1-28	39
40	56.1-23	40
41	57.1-22	41
42	58.1-11	42
43	59.1-15	43
44	60.1-14	44
45	61.1-14	45
46	62.1-12	46
47	63.1-12	47
48	64.1-12	48
49	65.1-12	49
50	66.1-15	50
51	67.1-12	51
52	68.1-12	52
53	69.1-12	53
54	70.1-12	54
55	71.1-12	55
56	72.1-12	56
57	73.1-12	57
58	74.1-12	58
59	75.1-12	59
60	76.1-12	60
61	77.1-12	61
62	78.1-12	62
63	79.1-12	63
64	80.1-12	64
65	81.1-12	65
66	82.1-12	66
67	83.1-12	67
68	84.1-12	68
69	85.1-12	69
70	86.1-12	70
71	87.1-12	71
72	88.1-12	72
73	89.1-12	73
74	90.1-12	74
75	91.1-12	75
76	92.1-12	76
77	93.1-12	77
78	94.1-12	78
79	95.1-12	79
80	96.1-12	80
81	97.1-12	81
82	98.1-12	82
83	99.1-12	83
84	100.1-12	84
85	101.1-12	85
86	102.1-12	86
87	103.1-12	87
88	104.1-12	88
89	105.1-12	89
90	106.1-12	90
91	107.1-12	91
92	108.1-12	92
93	109.1-12	93
94	110.1-12	94
95	111.1-12	95
96	112.1-12	96
97	113.1-12	97
98	114.1-12	98
99	115.1-12	99
100	116.1-12	100

***“Confia ao SENHOR as tuas obras e os teus
desígnios serão estabelecidos.”***

ÍNDICE TEMÁTICO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	1
3	MATERIAIS E MÉTODOS	1
3.1	Trabalhos de Campo.....	1
3.2	Petrografia.....	2
3.3	Química Mineral e Química do Vidro	2
3.4	Química de Rochas.....	2
3.4.1	<i>Pulverização das amostras.....</i>	3
3.4.2	<i>Dissolução das amostras e análise por ICP-OES.....</i>	3
4	GEOLOGIA.....	4
4.1	Contexto geológico regional.....	4
4.1.1	<i>A Província Magmática Paraná-Etendeka</i>	4
4.1.2	<i>O magmatismo ácido da Bacia do Paraná</i>	5
4.2	Geologia local	5
4.2.1	<i>Trabalhos Prévios.....</i>	5
4.2.2	<i>Levantamentos de campo.....</i>	6
4.2.3	<i>A Posição Estratigráfica das Rochas Vulcânicas Ácidas</i>	6
4.2.4	<i>Relações de Contato.....</i>	7
4.2.5	<i>Variações Texturais das Rochas Vulcânicas Ácidas.....</i>	7
5	PETROGRAFIA MICROSCÓPICA.....	9
5.1	Dacitos/traquitos com matriz vítrea predominante (Grupo 1).....	9
5.2	Dacitos/traquitos com matriz parcialmente vítrea (Grupo 2)	10
5.3	Dacitos/traquitos com matriz cristalina (Grupo 3).....	10
6	QUÍMICA MINERAL.....	11
6.1	Plagioclásio	11
6.2	Feldspato alcalino.....	12
6.3	Piroxênios	12
7	ESTUDO DO VIDRO POR MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSSONDA ELETRÔNICA: MICROESTRUTURAS E QUÍMICA.....	13
7.1	O processo de devitrificação: microscopia óptica e de varredura e análises de microsonda eletrônica por EDS.....	13

7.2	Análises químicas do vidro através de microsonda eletrônica por WDS	15
8	QUÍMICA DE ROCHAS.....	16
8.1	Comparação entre as análises obtidas e os dados existentes na literatura	17
8.1.1	<i>Diferenças entre laboratórios</i>	17
8.1.2	<i>A influência das amígdalas</i>	18
8.1.3	<i>O problema da variação do Mg#</i>	19
8.2	Apresentação dos Resultados de Química de Rocha	20
8.2.1	<i>Principais Características Químicas das Amostras</i>	20
8.2.2	<i>Diagramas de variação química</i>	20
9	ASPECTOS PETROGENÉTICOS	21
9.1	A Origem dos Magmas Ácidos.....	21
9.2	Evolução Magmática.....	22
9.3	Evolução Pós-Magmática.....	22
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1:	ESBOÇO GEOLÓGICO DA REGIÃO DE PIRAJU-OURINHOS (SP).....	26
FIGURA 2:	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS PLAGIOCLÁSIOS NO DIAGRAMA AN-AB-OR	27
FIGURA 3:	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS FELDSPATOS ALCALINOS NO DIAGRAMA AN-AB-OR.....	28
FIGURA 4:	COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE PIROXÊNIO NO DIAGRAMA Wo-En-Fs.....	29
FIGURA 5:	DIAGRAMAS DE VARIAÇÃO QUÍMICA PARA ROCHA TOTAL COMPARANDO AS AMOSTRAS ESTUDADAS E AS DE MONTANHEIRO (1999).....	30
FIGURA 6:	DIAGRAMAS DE VARIAÇÃO QUÍMICA PARA ROCHA TOTAL COMPARANDO AS AMOSTRAS ESTUDADAS E AS DE RAPOSO (1987).....	32
FIGURA 7:	CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DE ROCHAS VULCÂNICAS ÁCIDAS DE PIRAJU-OURINHOS NO DIAGRAMA TAS.....	34
FIGURA 8:	DIAGRAMAS DE VARIAÇÃO QUÍMICA COM AS ANÁLISES DE QUÍMICA DE ROCHAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	35

FIGURA 9: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS ESTUDADAS NO DIAGRAMA QZ-AB-OR.....	37
FIGURA 10: EVOLUÇÃO MAGMÁTICA DAS ROCHAS VULCÂNICAS ÁCIDAS DE PIRAJU-OURINHOS NO DIAGRAMA AN-AB-OR.....	38

ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 1: CONTATO DE ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA DA FM SERRA GERAL COM ARENITOS DA FM BOTUCATU.....	39
FOTO 2: CORPO INTRUSIVO DE ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA EM ARENITOS BOTUCATU.....	39
FOTO 3: ASPECTO DA ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA VÍTREA E AMIGDALOIDAL PERTENCENTE AO GRUPO 1.....	39
FOTO 4: AFLORAMENTO DE ROCHAS VULCÂNICAS ÁCIDAS COM FORTE DESPLACAMENTO SUB-HORIZONTAL.....	39
FOTO 5: ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA COM BANDAMENTO SECUNDÁRIO VERTICAL PERTENCENTE AO GRUPO 2.....	40
FOTO 6: BANDAMENTO PARALELO AO DESPLACAMENTO SUB-HORIZONTAL EM ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA DO GRUPO 2.....	40
FOTO 7: ASPECTO GERAL DE ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA PERTENCENTE AO GRUPO 2, DESTACANDO FORTE BANDAMENTO.....	40
FOTO 8: DETALHE DO BANDAMENTO DA ROCHA.....	40
FOTOS 9 A 16: FOTOGRAFIAS DIGITAIS DE LÂMINAS PETROGRÁFICAS.....	42
FOTO 17: IMAGEM DE ELÉTRONS RETRO-ESPALHADOS DA MATRIZ VÍTREA DA AMOSTRA OU-14, MOSTRANDO MICROCRISTAIS DE QUARTZO.....	43
FOTO 18: IMAGEM DE ELÉTRONS RETRO-ESPALHADOS DA MATRIZ VÍTREA DA AMOSTRA OU-02, MOSTRANDO ASPECTOS TEXTURAIS	44
FOTO 19: IMAGEM DE ELÉTRONS RETRO-ESPALHADOS DA MATRIZ VÍTREA DA AMOSTRA OU-14, MOSTRANDO ASPECTOS TEXTURAIS	45

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: ANÁLISES QUÍMICAS DOS PLAGIOCLÁSIOS OBTIDAS EM MICROSSONDA ELETRÔNICA POR WDS.....	46
TABELA 2: ANÁLISES QUÍMICAS DOS FELDSPATOS ALCALINOS OBTIDAS EM MICROSSONDA ELETRÔNICA POR WDS.....	47
TABELA 3: ANÁLISES QUÍMICAS DOS PIROXÊNIOS OBTIDAS EM MICROSSONDA ELETRÔNICA POR WDS.....	48
TABELA 4: ANÁLISES QUÍMICAS DA MATRIZ VÍTREA OBTIDAS EM MICROSSONDA ELETRÔNICA POR EDS.....	49
TABELA 5: ANÁLISES QUÍMICAS DA MATRIZ VÍTREA OBTIDAS EM MICROSSONDA ELETRÔNICA POR WDS.....	50
TABELA 6: ANÁLISES QUÍMICAS DE ROCHA TOTAL DAS AMOSTRAS ESTUDADAS POR ICP-OES.....	52

RESUMO

As únicas ocorrências de rochas vulcânicas ácidas da Fm Serra Geral (K) conhecidas no Estado de São Paulo afloram na região de Piraju-Ourinhos, como uma faixa que se estende por pouco mais de 60 km ao longo da calha do rio Paranapanema. Posicionam-se localmente na base da pilha vulcânica, mostrando deposição direta sobre os arenitos da Fm Botucatu, que predominam a sul. São recobertos, a norte, pelos basaltos da Fm Serra Geral ou, mais localmente, por arenitos do Grupo Bauru.

As rochas vulcânicas ácidas são levemente porfíricas, com fenocristais de andesina (An 50-30) e piroxênios (augita e pigeonita, com Mg# ~60 e 54, respectivamente), e subordinadamente titano-magnetita e apatita. A matriz, comumente hipocristalina, tem feldspato alcalino e quartzo intercrescidos, mas pode ser hialina (nas bordas dos derrames) ou holocristalina (em diques e núcleos de derrames).

Amostras texturalmente variadas coletadas em uma área geográfica ampla mostram pouca variação química, e têm composição no limite dos campos dos traquitos e dacitos, com $\text{SiO}_2 \sim 65\%$ e elevados teores de álcalis, com $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ (4,4% e 3,3% respectivamente). O Mg# é mais variável, entre 27 e 17.

A análise textural e química das rochas, das fases minerais e do vidro são compatíveis com a geração dos magmas a alta P e T (~1000°C), sob baixa $a(\text{H}_2\text{O})$, e evoluíram pela extração das fases presentes como fenocristais em direção ao mínimo granítico. Processos pós-magmáticos foram responsáveis pelo preenchimento de amígdalas, pela hematitização e por transformações na matriz vítrea (feições de devitrificação e diminuição do Mg#).

ABSTRACT

The only known occurrences of acid volcanic rocks from the Serra Geral Fm. (K) in the State of São Paulo appear in the Piraju-Ourinhos region, cropping out along the Paranapanema river valley for ca. 60 km. They were deposited directly over the Fm Botucatu sandstones, and are covered by basalts (or, locally, by younger sandstones from the Bauru Group), constituting thus the first volcanic products in the region.

The acid volcanics are porphyritic, with calcic plagioclase (An 50-30), pyroxenes (augite and pigeonite, with Mg# ~ 60 and 54, respectively) and accessory titano-magnetite and apatite. The groundmass is commonly hypocristaline, with intergrown quartz and alkali feldspar, except in the borders of flows (hyaline) and in dykes and central portions of flows (holocrystalline).

Texturally diverse samples collected in a wide geographic area show slight chemical variation, and have trachytic to dacitic compositions with ~65 wt% SiO_2 and high alkali

contents ($K_2O > Na_2O$, averaging respectively 4.4 wt% and 3.3 wt%). The Mg# is more variable, between 27 and 17.

The textural and chemical analysis of rocks, mineral phases and glass are consistent with a magma generation at high P, T ($\sim 1000^\circ C$) and low $a(H_2O)$, and evolved through the extraction of the minerals appearing as phenocrysts towards the granite minimum. Post-magmatic processes were responsible for amigdale filling, hematitization and transformation in the glassy groundmass such as deglassing and Mg# decrease.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho, e também durante todo o curso. Porém, para alguns alguns deixo um agradecimento especial.

Agradeço acima de tudo a Jesus que me capacitou em tudo para que este trabalho pudesse ser realizado e para que eu pudesse concluir este curso.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Valdecir de Assis Janasi por tudo o que me ensinou durante o tempo em que me orientou, e por ter se mostrado, além de um ótimo professor, um grande amigo. Ao professor Excelso Ruberti, pela disposição e colaboração.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos, mas principalmente aos meus pais, ao meu irmão, e à mãe Vandira, que em todo tempo me apoiaram e incentivaram com muito amor; e ao Rodrigo que sempre esteve do meu lado, mesmo tendo que passar vários finais de semana e feriados sozinho, enquanto eu estava em trabalhos de campo.

Agradeço às amigas Adriana Alves (Bisteca) e Lucelene Martins, pela ajuda, pelos palpites, sempre construtivos, e pela convivência durante a realização dos relatórios de pesquisa e deste trabalho de formatura.

Ao Marcos Mansueto do Laboratório de Microsonda Eletrônica, pelo apoio na realização das análises químicas de minerais. A toda a equipe técnica do Laboratório de Química e ICP-AES da USP e do Laboratório de Tratamento de Amostras da USP, pela ajuda na realização dos trabalhos de química de rocha. Ao pessoal do Laboratório de Laminação, pela confecção das lâminas petrográficas e de microsonda. Ao professor Gergely Szabó e à Angélica do Laboratório de Microscopia Óptica, pelo auxílio na obtenção das fotografias digitais.

E finalmente ao CNPq que me contemplou com uma bolsa auxílio durante os anos de 2001 a 2003, que também contribuiu para o desenvolvimento deste Trabalho de Formatura.

1 INTRODUÇÃO

A região de Piraju Ourinhos está situada na porção centro-oeste da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo, próximo à divisa com o Paraná. Nesta região afloram rochas representantes do vulcanismo cretácico da Bacia do Paraná, pertencentes à Formação Serra Geral, que possuem composições básicas e ácidas.

Este trabalho de formatura deu ênfase às rochas vulcânicas ácidas, situadas no campo entre os dacitos e traquitos, que foram estudadas segundo critérios geológicos, petrológicos e químicos.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho de formatura é a caracterização petrológica e química das rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju-Ourinhos (SP).

Informações sobre o caráter químico das fases componentes dessas rochas, o vidro e os minerais principais, são imprescindíveis para o melhor entendimento dos processos que atuaram durante a evolução magmática dessas rochas, do comportamento químico dos minerais durante as várias etapas de seu desenvolvimento, bem como da natureza do magma parental que gerou as rochas vulcânicas da região.

As principais ferramentas usadas para estudar a evolução dos magmas e os possíveis processos posteriores, especialmente a devitrificação, foram a petrografia microscópica em luz transmitida e refletida, as técnicas de microsonda eletrônica (microscopia eletrônica de varredura, análises por EDS e por WDS) e a análise química de rochas por ICP-OES.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 *Trabalhos de Campo*

Os trabalhos de campo foram realizados nos arredores das cidades de Timburi e Sarutaiá, durante dois dias, no mês de julho de 2003. Foram realizados alguns perfis (pontos OU-40 a OU-77, Figura 1), coletadas amostras dos vários tipos de rochas vulcânicas ácidas da região, e foram estudadas suas relações de contato com os basaltos e sedimentos pré e pós-vulcânicos. Embora parte da amostragem utilizada no trabalho tenha sido feita anteriormente pelo orientador (amostras OU-01 a OU-39), esta atividade foi importante para a melhor compreensão da situação geológica do vulcanismo ácido, apoiando a elaboração do esboço geológico apresentado neste trabalho.

3.2 Petrografia

A análise petrográfica foi realizada em vinte e duas amostras, e inclui análise macroscópica e microscópica. Nas análises microscópicas foram observados aspectos texturais, granulométricos e principalmente as características da matriz, vítrea e cristalina, e dos fenocristais e microfenocristais que compõe as rochas em estudo. Algumas microfotografias digitais da matriz e dos fenocristais também foram obtidas.

Para o estudo petrográfico foi utilizado o Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica do Instituto de Geociências da USP e as observações foram feitas em microscópio da marca Olympus do tipo BXP-50. Fotografias digitais, em microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida foram obtidas com o intuito de destacar os cristais e as texturas das rochas estudadas.

3.3 Química Mineral e Química do Vidro

Análises quantitativas por espectrometria de dispersão de comprimentos de onda (WDS) e análises qualitativas por dispersão de energia (EDS) foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Departamento de Mineralogia e Geotectônica, no Instituto de Geociências da USP. O equipamento utilizado foi um JEOL JXA-8600S, provido de detector ED e cinco espectrômetros de dispersão de comprimento de onda, cada qual com dois analisadores com automação de fabricação NORAN, e sistema Voyager 3.6.1.

Foram realizadas análises em oito amostras com o intuito de desvendar a composição química da matriz, dos fenocristais e microfenocristais das rochas estudadas. Imagens composicionais de elétrons retro-espalhados também foram obtidas no Laboratório de Microsonda Eletrônica e proporcionaram o melhor entendimento do processo de devitrificação da matriz vítrea das rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju-Ourinhos.

3.4 Química de Rochas

Foram realizadas duas etapas de análises químicas por ICP-OES no Laboratório de Química da USP, onde foram analisadas 14 amostras representativas do conjunto estudado. Todo o processo desde a preparação das amostras até a análise das mesmas foi realizado pela aluna.

As análises dos elementos maiores, menores e traços a partir de amostras representativas do pó das rochas estudadas foram realizadas no Laboratório de Química e ICP-OES do Departamento de Mineralogia e Geotectônica, a partir de um espectrômetro de emissão atômica com plasma induzido (ICP-OES), modelo ARL-3410, da Applied Research Laboratories. Os procedimentos analíticos necessários para a realização destas análises

são descritos a seguir.

3.4.1 Pulverização das amostras

A preparação das amostras para análise química inicia-se com a fragmentação de amostras com cerca de 100-300 g, realizada utilizando-se serra e prensa. Através da prensa as amostras são reduzidas à granulometria de 2–3 mm. Nesta etapa foram extraídas manualmente as amígdalas eventualmente presentes para que os resultados das análises se aproximassem o máximo possível das composições originais das amostras.

Devido à granulação fina a muito fina das amostras não foi necessária a utilização de britador com mandíbulas de aço e de quarteador. Uma alíquota de aproximadamente 100 g de cada amostra foi pulverizada em moinho de tipo planetário de ágata, por 15 minutos, ou até atingir granulometria menor que 200 mesh.

3.4.2 Dissolução das amostras e análise por ICP-OES

A abertura das amostras é efetuada por fusão alcalina do pó obtido a partir das amostras na etapa anterior, utilizando como fundente uma mistura de meta e tetraborato de lítio.

Os procedimentos iniciam-se com a pesagem de aproximadamente 2 gramas de amostra em cadinhos de porcelana, que são posteriormente aquecidos em estufa por cerca de vinte e quatro horas. Após a retirada da estufa os cadinhos são colocados em dessecador pelo período de uma hora, e então pesados para a obtenção da **perda de umidade** (H_2O), que é dada pela diferença entre o peso inicialmente obtido e aquele verificado após o aquecimento.

As determinações de **perda ao fogo** são realizadas com a pesagem de aproximadamente 1,0 g de amostra em cadinhos de porcelana, que a seguir, são submetidas à queima em mufla a 1000°C por uma hora. Após uma hora em dessecador para resfriamento as amostras são repesadas e determina-se, por diferença, a quantidade de voláteis nos materiais analisados.

Para a fusão utilizam-se $0,2500 \pm 0,0001$ g da amostra previamente seca, e $0,7500 \pm 0,0003$ g de fundente, que são pesados separadamente em cadinhos de porcelana. Após a pesagem amostra e fundente são homogeneizados utilizando-se bastão de vidro e transferidos para cadinhos de grafite. A fusão é realizada em mufla, pré-aquecida a 1000°C, durante 20 minutos. A massa fundida é então despejada em béquer plástico de 400 ml contendo solução ácida (150 ml de água destilada e 25 ml de ácido nítrico). A amostra é dissolvida com auxílio de bastões magnéticos em placa agitadora. A seguir, a solução é transferida para balões de 250 ml, completando-se o volume com água destilada. A solução

é finalmente filtrada em papel para garantir a retirada de partículas de grafite que eventualmente se soltem dos cadinhos durante a fusão ou quando da transferência para os béqueres. Cerca de 50 ml da solução final é separada e recebe 2 gotas de HF; essa alíquota é utilizada para análise de elementos menores e traços, e a adição de HF visa manter o Zr em solução.

A análise espectrométrica da amostra compreende uma série de cuidados que envolvem calibração do equipamento e o controle de drift. A calibração é feita com materiais de referência naturais cujas composições cobrem o espectro composicional entre granito e diorito. As curvas de calibração, que representam a correlação entre a concentração do elemento e a intensidade do sinal, devem ter coeficientes próximos de 1 ($\geq 0,9997$). O controle da flutuação da intensidade do sinal durante a corrida se dá através do emprego de uma amostra de controle de drift que é intercalada às demais amostras em intervalos de tempo fixo (a cada seis amostras). Dois materiais de referência são também incluídos na corrida, de forma a permitir um controle da qualidade dos resultados analíticos.

4 GEOLOGIA

4.1 Contexto geológico regional

4.1.1 A Província Magmática Paraná-Etendeka

A Província Magmática Paraná-Etendeka é uma das maiores ocorrências de basaltos continentais (CFB) do mundo, com cerca de 800.000 km³ de lavas formadas em um curto período de tempo (138-127 Ma; Stewart et al., 1996) em resposta à abertura do Atlântico sul e à influência térmica da pluma de Tristan da Cunha. As rochas vulcânicas ácidas representam cerca de 3% do total da província, com aproximadamente 16.000 Km³ em volume (Bellieni *et al.*, 1986).

A espessura dos derrames basálticos é muito variável, e alcança totais da ordem de 1000 metros em algumas seções. As exposições presentes na porção central do Estado de São Paulo são relativamente pouco espessas, em alguns trechos inferiores a 100 m, e em parte foram erodidas e recobertas por sedimentos mais jovens do Grupo Bauru e correlatos. Em sua quase totalidade, os basaltos aflorantes no Estado de São Paulo são correlacionados ao “tipo Pitanga”, caracterizado por elevados teores de Ti e P.

Expressivos volumes de magma basáltico contemporâneo ao vulcanismo da Bacia do Paraná cristalizaram em corpos subvulcânicos que se alojaram como sills ao longo de toda a seção da bacia, especialmente em discontinuidades como contatos entre diferentes formações e no contato dos sedimentos com o embasamento cristalino. Outra forma de ocorrência comum são os diques, que recortam principalmente o embasamento cristalino,

localmente formando enxames.

4.1.2 O magmatismo ácido da Bacia do Paraná

Rochas vulcânicas ácidas ocorrem de modo mais expressivo na porção meridional da Bacia do Paraná, onde normalmente são mais abundantes na parte superior da seqüência (Sartori *et al.*, 1975; Bellieni *et al.*, 1986; Garland *et al.*, 1995). O magmatismo ácido ocorreu em um curto período de tempo, a aproximadamente 131Ma (Turner *et al.*, 1994).

As rochas vulcânicas ácidas são divididas em dois grandes “tipos”. O tipo Palmas, predominante no extremo sul da bacia, apresenta amplo espectro composicional, compondo uma seqüência contínua até os basaltos de baixo Ti com os quais se associa. Modelamentos geoquímicos e isotópicos sugerem origem por mecanismos de cristalização fracionada a partir dos basaltos associada à assimilação de crosta granítica (Garland *et al.*, 1995).

Já o tipo Chapecó, predominante na metade setentrional da bacia, é restrito a composições ácidas, e tem assinaturas químicas e isotópicas semelhantes às dos basaltos de alto Ti com os quais se associa. O modelo mais aceito para a gênese dessas rochas é a refusão de basaltos colocados na interface crosta-manto (Raposo, 1987; Garland *et al.*, 1995), mas outras hipóteses, como a fusão de crosta continental, são alternativas apontadas por alguns autores (Harris & Milner, 1997; cf. também Garland *et al.*, 1995).

4.2 Geologia local

4.2.1 Trabalhos Prévios

As rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju têm sido pouco estudadas nos últimos anos. Podem ser destacados os trabalhos de Raposo (1987), com ênfase em aspectos geoquímicos, e de Montanheiro (1999), que aplicou sua pesquisa à identificação de matéria-prima para a indústria do cimento. Um número apreciável de análises químicas de elementos maiores obtidas por absorção atômica foi apresentado por Montanheiro (1999), por vezes em amostras coletadas nos mesmos afloramentos em que a coleção estudada foi obtida. Essas análises, e também aquelas apresentadas por Raposo (1987), revelam que as rochas ácidas têm composição predominantemente dacítica, com proporções subordinadas de riolitos e traquitos, e que o magmatismo na região tem caráter claramente bimodal (básico-ácido).

Aspectos geológicos foram enfocados por levantamentos aplicados à geologia de engenharia, de publicação restrita a relatórios técnicos, uma vez que a área de ocorrência das vulcânicas ácidas é cortada pelo rio Paranapanema, que em vários trechos foi represado para a construção de hidrelétricas administradas pela CESP.

Outros trabalhos sobre rochas vulcânicas ácidas podem ser úteis para a compreensão dos processos magmáticos que deram origem a estas rochas. Garland, *et al.* (1995), descreveram os riolitos da Bacia do Paraná e através de dados geoquímicos experimentais inferiram as possíveis condições e mecanismos de formação destas rochas.

4.2.2 Levantamentos de campo

Levantamentos geológicos preliminares foram feitos, antes do início deste trabalho, pelo orientador (cf. perfis apresentados na Figura 1: Rodovia Raposo Tavares, entre as cidades de Piraju e Ipaussu; o perfil que vai desta rodovia até Timburi; e o perfil realizado na região de Xavantes).

Nova etapa de trabalhos de campo foi realizada em julho de 2003, com o estudo de novos perfis e a visita a alguns afloramentos pertencentes aos perfis feitos anteriormente pelo orientador. Entre os novos perfis estão o da Serra da Fartura, entre as cidades de Fartura e Sarutaiá; e dois perfis a norte de Timburi, além de visitas a alguns afloramentos a sul desta cidade (Figura 1).

4.2.3 A Posição Estratigráfica das Rochas Vulcânicas Ácidas

A região de Piraju-Ourinhos (SP) está inserida na porção centro-oeste da Bacia do Paraná e as rochas nela presentes incluem a Formação Botucatu (sedimentos pré-vulcânicos), o Grupo Bauru (sedimentos pós-vulcânicos) e a Formação Serra Geral (rochas ácidas e básicas, na forma de derrames e intrusivas rasas).

A Figura 1 é um esboço geológico da área estudada e foi baseada no mapa geológico da Dissertação de Mestrado de Raposo (1987). Apresenta os pontos que foram visitados e as principais referências geográficas da região. As rochas vulcânicas ácidas ocorrem ao longo da calha do rio Paranapanema, em uma faixa com extensão de aproximadamente 60 km (ver Figura 1). Além da calha do rio Paranapanema também são observadas ocorrências isoladas destas rochas em locais com cotas topográficas mais altas, como na Serra da Fartura e a sul de Timburi.

Regionalmente, as camadas da Bacia do Paraná mostram suave mergulho para N-NW, de modo que a sucessão estratigráfica é observada nesse sentido. As rochas vulcânicas básicas situam-se a norte do Rio Paranapanema e em cotas topográficas um pouco mais altas, de modo que, em geral, são mais jovens que ácidas. Em vários locais foram observados contatos diretos das rochas vulcânicas ácidas sobre os arenitos eólicos da Fm Botucatu, e portanto representam a base da pilha vulcânica (Foto 1). Os sedimentos pós-vulcânicos (Grupo Bauru) têm contatos com as rochas vulcânicas ácidas e básicas (Figura 1).

4.2.4 Relações de Contato

Contrariamente ao esperado, os contatos observados entre as rochas vulcânicas ácidas e os arenitos da Formação Botucatu apresentam-se fortemente inclinados ou mesmo verticais em vários dos afloramentos visitados. Situações como esta mostram que a geometria dos corpos de rocha “vulcânica” ácida é complexa, dificultando seu mapeamento. Em alguns afloramentos da Serra da Fartura, região clássica de ocorrência de enxames de diques básicos, foram também observados diques de rochas ácidas (Ponto OU-52).

Em vários afloramentos onde são observados contatos horizontais as rochas vulcânicas ácidas se dispõem sobre os arenitos da Formação Botucatu. Porém, nestes mesmos locais, na parte inferior do afloramento as diferentes rochas encontram-se lado a lado e este contato é vertical, como observado nos pontos OU-58 e OU-71 (Foto 2). Ou seja, o contato é vertical na parte inferior do afloramento e se abre na parte superior tornando-se horizontal. Esta geometria do contato deve estar relacionada a diques que serviram de condutos alimentadores dos derrames que deram origem a estas rochas.

4.2.5 Variações Texturais das Rochas Vulcânicas Ácidas

Ao longo dos perfis realizados foram observadas diferenças texturais nas rochas vulcânicas ácidas. Estas diferenças estão em parte relacionadas à posição das rochas dentro do derrame. No perfil a nordeste da cidade de Timburi, esta variação é bem observada. O perfil inicia-se no ponto OU-65, na cota topográfica de 710 m e termina no ponto OU-70, na cota 500 m, nas margens do rio Paranapanema (Figura 1).

No ponto OU-65 as rochas vulcânicas ácidas apresentam cor cinza-clara, são levemente bandadas com matriz hipocristalina, fenocristais de plagioclásio e pouca quantidade de vesículas (Foto 5). Um deslocamento vertical é observado e deve estar relacionado ao resfriamento do derrame. No ponto OU-66, este deslocamento é sub-horizontal e bem mais evidente (Foto 4). As rochas deste afloramento também apresentam cor cinza-clara, matriz hipocristalina e fenocristais de plagioclásio, porém o bandamento por elas apresentado é muito mais evidente (Foto 6). As rochas citadas acima apresentam susceptibilidade magnética entre 8×10^{-3} e 15×10^{-3} SI. Uma forte mudança textural ocorre no ponto OU-67, na cota topográfica de 590 m. A rocha passa da cor cinza-claro para cinza-escuro e torna-se vítrea, sem fenocristais, com muitas amígdalas e até geodos (Foto 3). Não são observados bandamento e deslocamento, além disto a susceptibilidade magnética aumenta para aproximadamente 25×10^{-3} SI. No ponto OU-68, próximo ao contato com o arenito, na cota de 540m, as rochas são bem avermelhadas e amigdaloidais. A matriz destas rochas é vítrea, abriga alguns fenocristais de plagioclásio, e amígdalas que estão achatadas. A partir deste ponto inicia-se o domínio dos arenitos. No final do perfil, próximo

ao leito do rio, as vulcânicas ácidas voltam a aparecer, na forma de dique. Portanto nas cotas mais baixas abaixo dos contatos das vulcânicas ácidas com os arenitos, podem ser observados os diques que representavam os condutos alimentadores dos derrames.

Os diferentes tipos texturais citados acima foram também observados nos outros perfis e afloramentos visitados e foram distribuídos nos três grupos distintos apresentados a seguir.

O Grupo 1 destaca-se pela matriz vítrea de cor marrom-escuro e pelos fenocristais bem tabulares. Às vezes a cor marrom toma um tom avermelhado, principalmente nas proximidades do contato com o arenito. Estas rochas são afaníticas, possuem matriz vítrea, algumas apresentam fenocristais de plagioclásio com até 5 mm de comprimento, que se apresentam tabulares, em alguns casos bastante alterados. Amígdalas e vesículas são muito abundantes nestas rochas, e apresentam tamanhos de até 1 cm, sendo preenchidas por zeólitas, quartzo e calcedônia. Este grupo de rocha apresentou susceptibilidade magnética alta, em torno de 20×10^{-3} a 27×10^{-3} SI. Rochas deste grupo podem ser encontradas nos pontos OU-02, 05, 06, 08, 14, 42, 52, 67 e 68 (ver Figura 1).

O Grupo 2 representa o tipo textural mais comum. Caracteriza-se pela cor cinza-clara, pelo aspecto “manchado” da matriz, onde se mesclam porções claras, cristalinas, e porções de cor cinza ou marrom, vítreas. Em alguns locais mostra-se bastante porfirítica, com fenocristais de plagioclásio (com até 6 mm). Outras vezes, apresenta-se bandada, de modo que este bandamento deve estar ligado à presença de pequenas fraturas preenchidas por material cinza-metálico ou avermelhado (possivelmente hematita ou limonita, como produto de alteração da hematita original), já que as bandas claras ocorrem ao redor destas fraturas (Fotos 5 a 8). As vesículas e amígdalas são pouco freqüentes nestas amostras e apresentam diâmetros de até 4 mm. Estas rochas não foram encontradas nos contatos com os arenitos, embora em alguns locais elas pudessem estar nas proximidades destes contatos, já que foram observados diques clásticos em alguns afloramentos. A susceptibilidade magnética é mais baixa que nas rochas do Grupo 1, e está em torno de 6×10^{-3} e 8×10^{-3} SI. As rochas do Grupo 2 são encontradas nos seguintes pontos: OU-01, 04, 07, 12, 13, 15, 34, 36, 40, 47, 48, 52 a 54, 57, 59, 61, 62, 64 e 65 (ver Figura 1).

O último tipo textural, chamado de Grupo 3, ocorre em poucos afloramentos (ver pontos OU-09 e OU-33, na Figura 1). As rochas deste grupo destacam-se pela granulação mais grossa que a dos demais tipos e pela textura fanerítica fina. Apresentam cor cinza-clara e matriz holocristalina. Os fenocristais são menos freqüentes que nos outros grupos, assim como as vesículas e amígdalas. Este tipo textural não foi observado próximo aos contatos e deve representar as porções centrais dos derrames, ou até mesmo corpos intrusivos rasos.

5 PETROGRAFIA MICROSCÓPICA

Foi realizada a análise petrográfica de vinte e duas amostras de rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju, Xavantes e Timburi. Destas, dezoito amostras correspondem ao conjunto de lâminas OU, e quatro amostras ao conjunto de lâminas FTM, que foram cedidas por Tarcísio Montanheiro.

Foram escolhidas amostras pertencentes aos três grupos texturais identificados. As amostras representativas do Grupo 1 são as amostras OU-02, 05, 06a e 06b, 08 e 14, e FTM-225b, 225c, 258 e 259. Entre as amostras do Grupo 2 foram analisadas as amostras OU-01, 03, 04, 07, 12, 13 15, 32, 34 e 36. Finalmente para o Grupo 3 foram escolhidas as amostras OU-09 e OU-33.

5.1 Dacitos/traquitos com matriz vítrea predominante (Grupo 1)

As amostras deste grupo têm como principal característica a presença da matriz vítrea, que compõe 80% do total da rocha. Esta matriz se diferencia da matriz das rochas restantes por ser mais homogênea e por apresentar sinais claros da presença original de vidro. A devitrificação se manifesta como diferenças na cor (marrom-escuro a marrom-clara) e aglomerados de minerais opacos que ocorrem em forma de finos bastões envolvidos pelas porções mais claras da matriz (Foto 9).

A matriz abriga muitos cristais de minerais opacos, fenocristais de plagioclásio, além de cristais com hábitos típicos de super-resfriamento, como cristais de plagioclásio ocos e com hábito "rabo de andorinha" (Foto 10). Amostras fortemente vítreas, como OU-14, não apresentam esse tipo de plagioclásio.

Plagioclásio, piroxênio e alguns opacos ocorrem como fenocristais (aproximadamente 5% da rocha) e microfenocristais (cerca de 10% da rocha). Os fenocristais de plagioclásio (1-3 mm) são os mais abundantes, e têm como principais características o hábito prismático ou tabular e o forte zoneamento composicional (Foto 11). Muitos estão corroídos, tanto nas bordas como no centro. Podem exibir inclusões de apatita acicular. Os fenocristais de piroxênio (Foto 12), em geral são menores (1-2 mm) que os de plagioclásio, são subédricos ou anédricos e muitas vezes aparecem alterados, com limonita nas fraturas; alguns possuem inclusões de apatita e de plagioclásio. Titano-magnetita também ocorre como fenocristais, porém em proporções pequenas (muitas vezes com apenas um fenocristal por lâmina); exibem formas arredondadas, com bordas irregulares e corroídas. Os microfenocristais (0,1-0,3 mm) são de plagioclásio tabular ou "rabo de andorinha", piroxênio anédrico e minerais opacos, estes quase sempre associados ao piroxênio.

As vesículas representam 5% da rocha, são arredondadas ou alongadas e possuem tamanhos variados, que podem chegar a 2 mm. Muitas destas vesículas foram preenchidas

por minerais secundários como zeólitas, quartzo, argilominerais e carbonatos. Além disto filossilicatos de cor verde e quartzo estão presentes em suas bordas.

5.2 Dacitos/traquitos com matriz parcialmente vítrea (Grupo 2)

As amostras do Grupo 2, são hipocristalinas, com matriz heterogênea, onde porções mais vítreas, de cor cinza ou marrom e porções claras, mais cristalinas ocorrem lado a lado (Foto 13). Em algumas lâminas essas porções exibem contatos evidentes entre si, já em outras esses contatos são algo difusos. A proporção da matriz vítrea varia de amostra para amostra ou até mesmo em uma única amostra. Os principais minerais que compõem estas rochas são plagioclásio, piroxênios, feldspato alcalino e quartzo.

As porções claras predominam na matriz e são formadas principalmente por quartzo e feldspato alcalino. Estes minerais são geralmente anédricos e muitas vezes formam a textura micrográfica. O plagioclásio apresenta hábito tabular ou é anédrico, e a maioria dos cristais não são geminados. Ocorrem ainda pequenos minerais opacos e apatita com hábito acicular.

As porções vítreas apresentam cor marrom que varia do escuro para o claro, às vezes passando para o cinza. Minerais opacos alterados para limonita estão nestas porções, assim como pequenos cristais de plagioclásio ocos, aciculares ou com hábito de "rabo de andorinha" (Foto 14).

A proporção dos fenocristais é em média de 10%, com predomínio de plagioclásio e esparsos fenocristais de piroxênio. O plagioclásio (1,6–3,0 mm) exibe hábito tabular e zoneamento normal, muitos cristais estão alterados e fraturados, e alguns exibem núcleo e bordas corroídos (Foto 15). Inclusões de cristais aciculares de apatita (<1 mm) são freqüentes. Os fenocristais de piroxênio (Foto 16), em geral, ocorrem com tamanhos menores (0,6-2,5 mm) que os de plagioclásio; normalmente são subédricos e estão bem alterados, com filossilicatos em suas fraturas.

As vesículas ocorrem em pequena quantidade e tamanho. As amígdalas são mais raras e são preenchidas pelos mesmos minerais que as amígdalas das amostras do Grupo 1.

5.3 Dacitos/traquitos com matriz cristalina (Grupo 3)

Formado apenas pelas amostras OU-09 e OU-33, este grupo se diferencia dos restantes por apresentar-se holocristalina e ser composta principalmente por plagioclásio, quartzo e feldspato alcalino, além de minerais opacos e piroxênio em menores proporções e apatita como mineral acessório.

A matriz predominante nestas rochas é composta por cristais de plagioclásio, quartzo

e feldspato alcalino intersticiais e minerais opacos. Os cristais de plagioclásio são tabulares ou anédricos. Os de quartzo são anédricos e muitas vezes angulosos e também ocorrem intercrescidos com o feldspato alcalino, formando a textura micrográfica, muito freqüente nesta rocha. Os cristais de opacos, que se espalham por toda a matriz, são anédricos e estão alterados para limonita.

Os fenocristais perfazem 5% do total da rocha, estão representados pelo plagioclásio, mais abundante, e pelo piroxênio. Estes fenocristais de plagioclásio (1,5-3,5 mm) estão bastante alterados e fraturados e mostram sericita ou limonita em suas fraturas. Os de piroxênio são anédricos e menores (1,0-2,0 mm), e estão corroídos, apresentando fraturas preenchidas com filossilicatos.

As vesículas representam uma parte muito pequena da rocha, cerca de 1%. É comum o aparecimento de filossilicatos ou quartzo em suas bordas. Estes minerais também ocorrem preenchendo estas vesículas para formar amígdalas, porém estas ocorrem com menos freqüência.

6 QUÍMICA MINERAL

A avaliação das composições dos minerais e da matriz das rochas estudadas neste trabalho foi realizada em microsonda eletrônica por WDS e EDS. Foram analisadas amostras dos três grupos estudados, e abaixo encontram-se descritas as principais fases minerais analisadas:

6.1 Plagioclásio

Os cristais de plagioclásio estão presentes em todas as amostras. Exibem vários tamanhos e ocorrem desde a forma de fenocristais até a forma de microfenocristais ocos e com hábito de "rabo de andorinha". São geralmente euédricos, prismáticos ou tabulares, quando ocorrem como fenocristais; e subédricos, ou anédricos quando ocorrem como cristais menores. Apresentam-se comumente fraturados, às vezes com limonita ou sericita preenchendo essas fraturas, ou com as bordas corroídas. Normalmente, apresentam geminação polissintética ou do tipo Carlsbad. Também ocorrem cristais sem geminação; em ambos os casos, os cristais exibem zoneamento composicional normal. Inclusões de apatita acicular são muito comuns nos fenocristais de plagioclásio, e em algumas lâminas ocorrem também inclusões de piroxênio.

Os resultados das análises de microsonda por WDS de plagioclásios são apresentados na Tabela 1 e foram plotadas no diagrama An-Ab-Or (Figura 2).

A composição dos cristais de plagioclásio em todas as amostras são bastante

similares; e situam-se no campo das andesinas, com teores de anortita entre 30 e 50. Através da Figura 2 nota-se claramente que as composições dos fenocristais são mais cálcicas que as dos microfenocristais; estes últimos não alcançam teores acima de 40% de anortita.

Os teores de An dos fenocristais variam entre 40 e 50. Observa-se um zoneamento composicional normal, com núcleos mais cálcicos que as bordas. Nas amostras com matriz vítrea (OU-02 e OU-14) as bordas têm teores mínimos de An em torno de 40. Já nas amostras com matriz hipocristalina os teores de An nas bordas são mais baixos e sua composição se aproxima da composição dos microfenocristais.

Os microfenocristais são mais sódicos que os fenocristais, com teores de An entre 40 e 28. Assim como os fenocristais, eles mostram zoneamento composicional normal. Em alguns casos a borda possui composição de feldspato alcalino.

Quando ocorrem na matriz, os cristais de plagioclásio têm composição igual à dos microfenocristais, com teores de anortita em torno de 35.

6.2 Feldspato alcalino

O feldspato alcalino está presente em algumas amostras, predominantemente nas que possuem matriz cristalina e subordinadamente nas que possuem matriz vítrea. É anédrico e ocorre na forma de pequenos cristais, que ocupam os interstícios, confundindo-se com o quartzo. Em algumas lâminas este mineral apresenta intercrescimento com o quartzo, formando a textura micrográfica, que indica que estes dois minerais cristalizaram no ponto eutético.

Os resultados das análises de microsonda eletrônica por WDS são apresentados na Tabela 2 e foram plotados em diagramas ternários do tipo An-Ab-Or (Figura 3). Foram analisados microfenocristais e cristais da matriz.

Os microfenocristais apresentam núcleos mais cálcicos que as bordas. Nos gráficos das amostras OU-01A e OU-02, as composições dos núcleos caem no campo dos plagioclásios, enquanto as das bordas são feldspatos alcalinos. As bordas dos microfenocristais apresentaram-se mais potássicas na amostra OU-01A, e nesta não há núcleos de feldspato alcalino. Os núcleos de feldspato alcalino nos microfenocristais ocorrem nas amostras OU-02 e OU-14, de modo que na primeira os núcleos são sódicos e na segunda o núcleo é mais potássico. Os cristais de feldspato alcalino da matriz são mais ricos em potássio, que os microfenocristais.

6.3 Piroxênios

Os piroxênios encontrados nas rochas analisadas são a augita, mais abundante, e a

pigeonita. Os cristais de piroxênio, assim como os de plagioclásio, aparecem tanto na forma de fenocristais como na forma de cristais menores. São euédricos a subédricos, normalmente estão alterados e fraturados, sendo que em alguns casos há filossilicatos nessas fraturas e possivelmente anfibólio em suas bordas.

Os cristais de piroxênio em geral não se mostram muito alterados, entretanto em algumas amostras do Grupo 1, principalmente nas que apresentam cor avermelhada, os piroxênios mostram-se muito alterados.

Foram realizadas análises em microsonda eletrônica por WDS dos piroxênios das amostras dos três grupos, os resultados são apresentados na Tabela 3 e na Figura 4. Através dos resultados obtidos nota-se que os diferentes tipos texturais não influenciam nas composições dos piroxênios.

Os fenocristais revelaram composições cálcicas com teores de An em torno de 17. Diferenças nestes teores não são muito significativas em relação às análises de núcleo e borda destes fenocristais. Os microfenocristais podem ser augitas ou pigeonitas e assim como os fenocristais, eles não apresentam diferenças significativas do núcleo para a borda. Também foi observada a presença de um cristal de piroxênio incluso em um fenocristal de augita, que através da análise revelou que a inclusão é uma pigeonita.

O diagrama Wo-En-Fs (ver Figura 4) mostra os resultados das análises de fenocristais e microfenocristais de augita e pigeonita. As composições não mostraram dispersões significativas tanto para o campo da augita quanto para o campo da pigeonita. Apenas a composição da borda de um fenocristal da amostra OU-32, mostra-se ligeiramente afastada do conjunto das augitas, mostrando o enriquecimento em ferro ao longo da cristalização.

Zeólitas

Montanheiro (1999), identificou através de difração de raios-X, dois tipos de zeólitas nessas rochas, a mordenita e a nontronita. Estes minerais estão relacionados a processos de alteração hidrotermal e ocorrem somente em âmígdalas, que encontram-se principalmente nas rochas de matriz mais fina. Possuem cor branca e muitas vezes apresentam-se radiadas.

7 ESTUDO DO VIDRO POR MICROSCOPIA ÓPTICA E MICROSSONDA ELETRÔNICA: MICROESTRUTURAS E QUÍMICA

7.1 O processo de devitrificação: microscopia óptica e de varredura e análises de microsonda eletrônica por EDS.

O vidro está presente na matriz das rochas dos Grupos 1 e 2, porém sua presença é

mais evidente nas rochas do primeiro grupo.

O processo de devitrificação da matriz foi estudado através do microscópio petrográfico e por imagens composicionais de elétrons retro-espalhados acompanhadas de análises de microsonda eletrônica por EDS. Adicionalmente foram obtidas análises de microsonda eletrônica por WDS que serão discutidas no próximo item.

A devitrificação é mais intensa nas amostras do Grupo 2, que possuem matriz hipocristalina, com vidro bastante heterogêneo. Já as amostras do Grupo 1, que possuem matriz predominantemente vítrea, são mais homogêneas.

Observadas ao microscópio petrográfico a maioria das amostras apresenta vidro heterogêneo, com aspecto manchado e com cores que variam do marrom ao cinza, em tons claros ou escuros. Apenas nas amostras OU-14 e FTM 259, o vidro mostra-se mais homogêneo, apresentando cor marrom escura com poucas manchas marrom claras.

Essas manchas estão relacionadas com aglomerados de minerais opacos na forma de finos bastões, que ocorrem no centro das manchas claras do vidro (Foto 9). O padrão de manchas com diferentes tons de marrom e cinza apresentado pelo vidro está relacionado aos teores de sílica e óxidos de ferro na composição do vidro. Possivelmente o ferro migrou para estes aglomerados e a porção ao seu redor tornou-se rica em sílica, por isso possui cor mais clara. Nas porções em que o vidro é mais escuro os bastões de opacos são menos freqüentes, o que significa que estas porções não perderam ferro para os aglomerados de minerais opacos.

Em algumas destas porções claras puderam ser observados, ao microscópio petrográfico, pequenos cristais com relevo e birrefringência baixos, que apresentam hábitos plumosos e pequenas manchas arredondadas muito claras, estes ao serem analisados quimicamente revelaram respectivamente composições de feldspato alcalino e de quartzo, sugerindo que o processo de devitrificação já está gerando pequenos cristais destes minerais.

Imagens de elétrons retro-espalhados, confirmaram a presença de cristais de quartzo na matriz das rochas dos dois grupos, indicando que ao nível submicroscópico, já está havendo geração de microcristais de quartzo (Foto 17), devido ao processo de devitrificação. Além de revelar a presença de microcristais, as imagens ainda mostraram que a matriz vítrea apresenta diversos padrões texturais que são reflexo de diferenças composicionais entre cada região desta matriz.

A matriz vítrea nas imagens de elétrons retro-espalhados apresenta cor branca ou cinza, que varia de tons claros a tons muito escuros. Microcristais arredondados ou alongados estão em meio à matriz e formam texturas manchadas ou com aspectos “zebrados” (Fotos 18 e 19). Análises pontuais de EDS foram obtidas em diferentes regiões da matriz. Estes locais estão representados pelos números nas fotos 17, 18 e 19, e os resultados destas análises podem ser vistos na Tabela 4.

As diferentes cores apresentadas pelo vidro são resultado da diferença do número atômico médio de cada porção estudada, de modo que locais com elementos com maior número atômico médio aparecem na imagem com cores mais claras em relação aos que possuem elementos com número atômico médio mais baixo. Desta forma, nas imagens de elétrons retro-espalhados as cores do vidro são invertidas em relação ao microscópio petrográfico, assim as porções com maior teor de quartzo mostram-se mais escuras que as porções com maior teor de ferro e titânio.

As porções mais claras que assumem formas arredondadas, como nos pontos 1, da Foto 18a, e 2, da Foto 18b, revelaram composições ricas em Fe_2O_3 , com teores médios de 6%, e relativamente pobres em SiO_2 , com teores médios de 68%. Já as porções escuras, que apresentam-se ora arredondadas, ora alongadas, são mais ricas em SiO_2 , com teores de 78%, e mais pobres em Fe_2O_3 , (Ponto 6, da Foto 18a, e Ponto 2, da Foto 19a).

Assim como as manchas arredondadas, a matriz também apresenta variações nos tons de cinza devido aos teores de óxido de ferro e sílica.

A Foto 18a representa bem esta variação. Em sua parte superior, a matriz apresenta tons de cinza muito claros, já na parte inferior apresenta tons de cinza mais escuros. Nas porções mais claras da matriz vítrea (Ponto 7), que são mais ricas em ferro, nota-se predomínio de manchas arredondadas (Ponto 5) e alongadas escuras. Possivelmente esta textura é resultado da migração da sílica para estas manchas escuras que possivelmente são cristais de quartzo. Nas porções escuras, que são mais ricas em sílica, ocorre o oposto, cristais de minerais opacos são mais abundantes, sugerindo que o ferro e o titânio da matriz migraram para estes minerais, deixando o vidro mais rico em sílica (Pontos 3 e 4).

Esta migração é parte do processo de devitrificação que atua sobre a matriz. Nas rochas aqui estudadas, os resultados deste processo são a geração de novos cristais, a heterogeneidade química do vidro e as diferentes cores e texturas apresentadas pela matriz.

7.2 Análises químicas do vidro através de microsonda eletrônica por WDS

Os resultados das análises de vidro obtidos em microsonda eletrônica por WDS são encontrados na Tabela 5. As análises foram feitas em porções da matriz com cores que variam do marrom muito claro ao marrom muito escuro, com intuito de determinar se existem variações químicas nestas diferentes porções.

A Tabela 5 mostra que o vidro tem composição ácida, com teor médio de SiO_2 em torno de 73% e com elevado teor de álcalis, onde $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, estes com teores médios em torno de 5,6% e 3,7% respectivamente. Os teores de ferro são relativamente altos, e os teores de MgO muito baixos.

Os valores médios de Mg\# do vidro mostraram-se mais baixos nas amostras de cor avermelhada, sugerindo uma relação entre esse índice e os processos que resultaram na

geração dessa coloração.

As análises nas diferentes porções, escuras e claras, mostram que há pequenas variações nos teores de sílica e de óxidos de ferro conforme a cor que o vidro apresenta.

As porções escuras do vidro mostram-se mais ricas em óxidos de ferro e mais pobres em sílica, com teores médios de 71% de SiO_2 e 1,5% de Fe_2O_3 . As regiões muito escuras do vidro apresentam teores de sílica muito parecidos com os das porções escuras, entretanto os teores de óxidos de ferro são mais altos e chegam a 2% de Fe_2O_3 .

As porções claras são mais ricas em sílica, com teores médios de 77% e mais pobres em óxidos de ferro com valores que não alcançam 0,9% de Fe_2O_3 . As porções muito claras do vidro apresentam valores de ferro muito baixos, enquanto que os teores de sílica são os mais altos de todas as análises, chegando a composições com 99%.

Os resultados das análises do vidro por WDS são compatíveis com as considerações feitas no item anterior: o vidro é quimicamente heterogêneo, com porções claras mais ricas em sílica e porções escuras mais ricas em ferro. Estas diferenças são resultado da migração de elementos na matriz vítrea. Esta migração está relacionada ao processo de devitrificação e é responsável pelo aparecimento de cristais de quartzo e de bastões de minerais opacos na matriz vítrea.

8 QUÍMICA DE ROCHAS

As rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju já foram analisadas quimicamente por Raposo (1986) e por Montanheiro (1999). Ambos analisaram grande quantidade de amostras. Os resultados plotados em gráficos de SiO_2 contra elementos maiores mostraram grande dispersão, sugerindo inicialmente a possibilidade de existir uma diversidade de magmas ácidos na região.

Foram obtidas por ICP-OES análises químicas de quatorze amostras estudadas neste projeto (cf. Tabela 6). Dez dessas amostras são representativas dos três diferentes grupos petrográficos identificados neste trabalho. Embora coletadas em diferentes regiões (Piraju, Xavantes e Timburi), não mostraram dispersão tão acentuada como a observada nos dados da literatura. Outras quatro amostras foram cedidas por Tarcísio Montanheiro, e correspondem a reanálises de amostras de sua Tese de Doutorado, aqui realizadas com o objetivo de identificar as causas da dispersão encontrada nos dados da literatura. Uma delas (FTM-225c, correspondendo à análise original TM-284), foi preparada a partir da amostra bruta, possibilitando assim a extração de suas amígdalas antes da pulverização. As outras três amostras foram analisadas a partir do pó preparado por aquele pesquisador, sem a extração das amígdalas, já que para a pesquisa apresentada por Montanheiro (1999), que procurava identificar rochas com propriedades pozolânicas, o interesse se voltava para a caracterização do material total.

Uma comparação entre os dados obtidos neste projeto e os dados da literatura, procurando discutir as diferenças observadas, é apresentada logo abaixo. Em seguida, são discutidas as características químicas principais das rochas vulcânicas ácidas de Piraju e o seu significado.

8.1 Comparação entre as análises obtidas e os dados existentes na literatura

Foram analisadas quimicamente no Laboratório de Química e ICP-OES da USP quatro amostras fornecidas por Montanheiro. Destas, três foram fornecidas em pó e uma (FTM-225c) foi fornecida como amostra bruta. Esta última foi processada no Laboratório de Tratamento de Amostras do Instituto de Geociências da USP juntamente com mais dez amostras da série OU. Apresentava grande quantidade de amígdalas preenchidas por sílica e outros minerais, possivelmente zeólitas, que foram extraídas durante a preparação.

Os resultados das análises são apresentados na Tabela 6 e nos gráficos de SiO_2 x elementos maiores, representados nas figuras 5a e 5b, que também apresentam os resultados obtidos por Montanheiro (1999) e nas figuras 6a e 6b, onde foram plotados os dados de Raposo (1987).

8.1.1 Diferenças entre laboratórios

Na Figura 5 estão plotadas três análises de Montanheiro (amostras TM-287, 311 e 312) e os resultados de sua reanálise (aqui designadas, respectivamente, FTM-225b, 258 e 259); os pares foram unidos por linhas cheias.¹

A Figura 5 revela que existem diferenças sistemáticas entre os resultados obtidos nos dois laboratórios em que foram realizadas as análises. Embora estas diferenças não sejam em geral muito fortes, elas podem em alguns casos resultar em mudança do nome da rocha (em um caso, de dacito para traquito). Observa-se que as diferenças nos teores em cada diagrama são quase sempre as mesmas entre os pares, enfatizando o caráter sistemático da diferença.

As principais diferenças observadas estão nos teores de SiO_2 , K_2O e P_2O_5 . As amostras analisadas no laboratório da USP apresentaram teores significativamente mais baixos de SiO_2 (cerca de 1%) do que as amostras analisadas no laboratório utilizado por Montanheiro. Já os teores de K_2O aumentaram fortemente nas reanálises, aumentando em até 1% o teor obtido anteriormente.

Os teores de P_2O_5 para as amostras analisadas por Montanheiro mostram uma forte

¹ Para cada par foi utilizada uma mesma cor. Os símbolos utilizados representam o tipo de rocha (traquito, dacito e riolito) obtido pela classificação química de Le Maitre et al. 1989. O símbolo em maior tamanho representa a amostra reanalisada neste trabalho.

dispersão, evidenciando que o laboratório que as realizou apresentou problemas para as análises deste óxido. Este fato pode ser percebido porque as amostras reanalisadas pelo laboratório da USP, não mostram teores tão diferentes entre si como mostram as análises anteriores (ver linha pontilhada na Figura 5b). Além disto, os teores obtidos na reanálise são próximos aos teores obtidos para os conjuntos de amostras OU, e aos obtidos por Raposo (1987), onde o P_2O_5 também mostra teores bem próximos entre as amostras estudadas (ver diagrama na Figura 6b).

Para o restante dos elementos os teores variaram ligeiramente. Os teores de Al_2O_3 aumentaram cerca de 0,5%, os de CaO caíram levemente e os de Na_2O mantiveram-se praticamente os mesmos. Para Fe_2O_3 e MgO houve ligeira queda dos teores, e a razão $MgO/(MgO+FeO)$ acompanhou esta queda.

8.1.2 A influência das amígdalas

As análises químicas das amostras FTM-225c e TM-284 foram utilizadas para investigar a influência das amígdalas na modificação da composição original das rochas magmáticas da região. A amostra TM-284, que foi analisada previamente por Montanheiro (1999) a partir da rocha total (sem a extração das amígdalas), foi preparada novamente, agora extraíndo o material de preenchimento de amígdalas, e foi reanalisada, agora identificada como FTM-225c.

Comparando-se as análises das amostras TM-284 e FTM-225c (ver Figura 5), pode-se perceber que as amígdalas causam um aumento significativo do teor de SiO_2 na amostra, que passa de traquito para riolito. Portanto pode-se concluir que as amígdalas influenciam os resultados obtidos, mudando a composição original da rocha, já que foram preenchidas por minerais secundários.

A retirada das amígdalas provocou mudanças no teor de vários óxidos. Com a diminuição do teor de SiO_2 na amostra, pode-se perceber um aumento no teor de quase todos os óxidos presentes. Sabe-se que este aumento não está relacionado às diferenças entre os laboratórios, já que em alguns casos este aumento não é proporcional aos observados no item anterior, como no caso de Fe_2O_3 e MgO ; ou é contrário às diferenças laboratoriais, como nos teores de CaO e Na_2O .

Os teores de K_2O para estas amostras mantiveram-se praticamente iguais. Este fato não segue o padrão de diferença entre os laboratórios para este elemento, como visto no item anterior. Portanto, pode-se dizer que este elemento estava presente nas amígdalas extraídas, já que um aumento do teor de K_2O da amostra FTM-225c não foi observado em relação à amostra TM-284.

Os diagramas para óxidos de ferro e magnésio também revelam um aumento dos

teores com a retirada das amígdalas. Porém, nota-se que este aumento não foi proporcional entre os dois elementos: o teor de Mg aumentou mais do que o de Fe, fato que é observado através do aumento do Mg#². Desta maneira, o aumento proporcionalmente menor do teor de Fe deve estar relacionado à presença deste elemento nas amígdalas que foram retiradas.

O grande espalhamento dos elementos observado nos diagramas com as análises de Montanheiro não é observado nos diagramas que apresentam os dados de Raposo, que não incluiu as amígdalas nas análises realizadas (Figuras 6a e 6b). Em quase todos os diagramas os dados de Raposo estão concentrados, e as análises obtidas das amostras estudadas neste projeto mostram-se coerentes com estes dados. Comparando-se os diagramas onde foram plotados os dados de Raposo e os dados de Montanheiro, nota-se que para alguns elementos há diferenças significativas nos teores. Como exemplo tem-se o diagrama de SiO₂, onde teores de Na₂O de Montanheiro mostram muita dispersão e situam-se predominantemente abaixo de 3%; já nas amostras analisadas neste trabalho e nas analisadas por Raposo os teores são mais concentrados, e estão predominantemente acima de 3%. Os teores de Al₂O₃, CaO e K₂O também mostram-se mais dispersos nos dados de Montanheiro.

As diferenças observadas mostram a influência das amígdalas na composição da rocha, de modo que é evidente que grande parte da dispersão que é observada nos dados de Montanheiro é provocada pela presença do material presente nas amígdalas durante as análises, dando deste modo a falsa impressão de que na região estudada ocorrem rochas de composições variadas. Já as análises deste trabalho e as de Raposo, que não incluíram as amígdalas, mostram que as rochas da região apresentam composições químicas muito próximas entre si.

8.1.3 O problema da variação do Mg#

Os diagramas de SiO₂ contra Mg# mostraram dispersão nos dados de Raposo e Montanheiro, diferentemente do conjunto de amostras estudado neste trabalho, que não apresentou diferenças fortes do número de magnésio entre as amostras (ver Figuras 5b e 5b). Esta variação não está relacionada apenas ao material presente nas amígdalas, já que as análises de Raposo também mostram esta variação. É importante notar que a dispersão ocorre, nos dados de Raposo, somente para o Mg#; nenhum outro elemento analisado, exceto Fe e Mg, acompanha esta variação.

As amostras que apresentam Mg# mais baixo possuem algumas características

² O número de Mg (Mg#) é calculado a partir da razão de MgO pela soma de FeO e MgO. Nas análises realizadas não foi feita a separação entre FeO e Fe₂O₃. Sabendo-se que parte do ferro das amostras é trivalente, o número de Mg calculado para estas amostras não será o real, mas sim o número mínimo de Mg.

diferentes das restantes, como a cor avermelhada da matriz vítrea e a presença de muitas amígdalas e vesículas. Além disto estas rochas estão sempre associadas aos contatos com os arenitos da Fm Botucatu. Possíveis causas para esta variação serão discutidas no item 9.

8.2 Apresentação dos Resultados de Química de Rocha

8.2.1 Principais Características Químicas das Amostras

As análises químicas dos elementos maiores e menores estão representadas na Tabela 6. Os valores de perda ao fogo situam-se entre 0,7 e 1,8%, possivelmente refletindo ainda a presença de pequenas amígdalas que não puderam ser retiradas no processo de tratamento anterior à pulverização das amostras.

Através das análises químicas obtidas, a maioria das amostras foi classificada como traquito; apenas três amostras estão no campo dos dacitos. A Figura 7 mostra, de qualquer forma, que todas as rochas estão concentradas em um campo próximo ao limite entre estes dois tipos de rocha.

Não são observadas diferenças significativas nos teores dos óxidos entre as amostras, com exceção das amostras OU-09 e OU-34, que se comportam de modo ligeiramente distinto das demais, apresentando características um pouco mais diferenciadas, refletidas em seus teores de SiO_2 mais elevados e CaO e MgO mais baixos. Em relação aos elementos menores e aos traços analisados (Ba, Sr, Zr) as amostras mostraram-se também muito homogêneas.

Os resultados mostram que os teores de SiO_2 estão em torno de 65%; os teores de Fe_2O_3 são relativamente altos, em média 7%; e os teores de álcalis são altos, com $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ (com aproximadamente 4,4% e 3,3% respectivamente). O Mg\# varia entre 17 e 27, uma dispersão significativa, mas menor que a observada nas análises da literatura. O índice de saturação em alumina (ASI) mostra o caráter metaluminoso das rochas ($\text{ASI} = 0,86$ a $1,0$).

8.2.2 Diagramas de variação química

Os dados obtidos pelas análises químicas das amostras foram plotados em diagramas binários utilizando SiO_2 como índice de diferenciação (Figuras 8a e 8b).

Apesar da pequena dispersão, pode-se observar uma tendência de fracionamento do conjunto. Entre as amostras analisadas, OU-09 e OU-34 mostram-se sempre em estágios de fracionamento mais avançados, mas seguindo a tendência de fracionamento das outras amostras do conjunto. Nos diagramas nota-se que os teores de SiO_2 destas amostras são

mais elevados que os das demais, enquanto os teores de CaO, MgO e Na₂O mostram-se mais baixos.

Nos diagramas de Al₂O₃, K₂O e P₂O₅ as amostras mostraram-se bem concentradas não apresentando dispersão significativa para estes elementos entre si. Nos diagramas restantes foi observada ligeira dispersão entre as amostras, principalmente para as amostras FTM-225B, FTM-258 e FTM-259, que foram pulverizadas por Montanheiro e apresentam baixo número de magnésio.

O diagrama de SiO₂ contra Mg# mostra pouca variação do número de Mg entre as amostras. As amostras OU-09, OU-32 e OU-34 foram as que apresentaram valores mais baixos em torno de 17 e 19; ainda assim estes valores são altos se comparados aos das amostras pulverizadas por Montanheiro, que apresentam Mg# entre 3 e 9. No diagrama de SiO₂ x Fe₂O₃ grande parte das amostras mostram teores próximos entre si, em torno de 7% Fe₂O₃; já as amostras que apresentaram baixo Mg# estão um pouco mais dispersas do conjunto, com teores de ferro ligeiramente mais altos, sendo que a amostra FTM-259 chega a 8%.

As amostras OU-09 e OU-34 juntamente com as amostras pulverizadas por Montanheiro mostram teores de CaO mais baixos que o restante do conjunto: enquanto os primeiros estão com teores abaixo dos 2%, o restante do conjunto ocorre concentrado entre 2% e 3%. No diagrama de SiO₂ x Na₂O as amostras estão entre 3,2 e 3,7% de Na₂O. Apenas OU-34 e FTM-259 distanciam-se um pouco do conjunto, já que são levemente mais pobres em Na₂O.

9 ASPECTOS PETROGENÉTICOS

9.1 A Origem dos Magmas Ácidos

A hipótese mais aceita para a gênese das rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju-Ourinhos, correspondentes ao tipo Chapecó, sugere que os magmas parentais destas rochas são produtos da fusão parcial de “underplates” basálticos (Raposo, 1987; Garland *et al.*, 1995). No entanto, eles parecem ter sido as primeiras manifestações extrusivas na região, sugerindo um período inicial de retenção dos basaltos na base da crosta.

O modelo de fusão de crosta continental também foi sugerido por alguns autores (Harris & Milner, 1997; cf. também Garland *et al.*, 1995).

O diagrama Qz-Ab-Or (Figura 9), onde estão plotadas as composições de rocha total e da matriz vítrea, e os pontos de mínimo do sistema haplogranítico, mostra que as composições do líquido situam-se bastante afastadas dos mínimos graníticos a baixas pressões, indicando que estas rochas devem ter se formado a altas profundidades e com baixa atividade de água.

9.2 Evolução Magmática

O estudo da evolução magmática utilizou-se do diagrama ternário An-Ab-Or, onde foram plotadas as análises das amostras OU-02, OU-14 e FTM-259 (ver Figura 10). O diagrama também mostra as curvas de *solvus* a diferentes temperaturas calculadas pelo programa Solvcalc (Wen & Nekvasil, 1994) e a linha de co-precipitação de plagioclásio e feldspato alcalino, a pressões de 1 Kb e $a(\text{H}_2\text{O})=1$ (segundo Thompson, 1996).

Com os resultados das análises químicas de rocha-total e do vidro foi possível inferir os prováveis “caminhos” de cristalização percorridos pelo magma.

As análises de plagioclásio, feldspato alcalino e matriz podem indicar como este magma evoluiu. A composição dos fenocristais de plagioclásio, que apresentam teores de An entre 40 e 50, representam o início da cristalização do magma; a matriz vítrea, que apresenta teores muito baixos de An e altos de Ab e Or, representa o final da cristalização (ver Figura 10).

O avanço da cristalização do magma é controlado pela extração dos fenocristais de plagioclásio cálcico, que vai modificando a composição inicial do magma. As curvas coloridas, representadas na Figura 10, mostram o possível fracionamento do magma até chegar à linha de co-precipitação de plagioclásio e feldspato alcalino. O magma, devido à formação de cristais de plagioclásio, vai se empobrecendo em cálcio e se enriquecendo em sódio e, principalmente, em potássio. Ao alcançar a linha cotética feldspato alcalino e plagioclásio co-precipitam.

A observação textural mostra que o feldspato alcalino não alcança, nessas rochas, tamanhos de fenocristais e se forma apenas nas bordas dos microfenocristais de plagioclásio.

A composição da amostra FTM-259 mostra-se mais rica em Or e mais pobre em An que as outras duas amostras, o que pode ser devido à alteração dos fenocristais de plagioclásio presentes na rocha. Assim, sua composição pode não refletir o fracionamento magmático, mas sim processos posteriores.

9.3 Evolução Pós-Magmática

As evidências dos processos pós-magmáticos sofridos pelas rochas vulcânicas ácidas podem ser observadas texturalmente e quimicamente. Os processos pós-magmáticos, que atuaram nas rochas estudadas, apresentam como feições o preenchimento de amígdalas por minerais secundários; a hematitização; transformações associadas ao processo de devitrificação; e variações no Mg#.

As amígdalas, resultantes de processos hidrotermais, ocorrem em quantidades

variáveis nas rochas estudadas, e são mais abundantes nas rochas do Grupo 1. Os minerais secundários que as preenchem são calcedônia, quartzo, zeólitas e filossilicatos. A influência destes minerais na composição original do magma foi enfocada no item 7.

A hematitização ocorre como resultado da alteração de hematita original. Esta alteração é observada como preenchimento de pequenas fraturas, que podem estar relacionadas ao resfriamento dos derrames.

O processo de devitrificação sofrido pela matriz vítrea e os valores de Mg# muito baixos parecem estar, em parte, relacionados. Análises realizadas em microsonda eletrônica por WDS mostraram que a matriz vítrea apresenta teores de Mg muito baixos (em torno de 0,05% para as porções escuras e até abaixo dos limites de detecção para as porções claras da matriz), contrastando com a presença dos fenocristais e dos microfenocristais de piroxênio magnésiano na rocha. Análises em microsonda eletrônica por EDS associadas a imagens de elétrons retroespalhados mostraram que a matriz vítrea destas rochas apresenta cristais muito pequenos, em escala nanométrica, indicando que está em processo de devitrificação. Através das imagens foram escolhidos locais claros e escuros da matriz que foram analisados por EDS, estas análises mostraram porções da matriz muito ricas em SiO_2 (~ 80%) e outras muito ricas em Fe_2O_3 (~18%). A falta de Mg na matriz juntamente com o aumento do teor de Fe, provocam a diminuição do Mg# na rocha.

Além disto, amostra FTM-259 que apresentou o menor Mg#, apresenta os cristais de piroxênio bastante alterados. Uma análise de microsonda eletrônica por WDS em relicto de piroxênio desta amostra, mostrou composição similar à dos piroxênios das amostras com Mg# mais alto. Portanto, a diminuição do Mg# deve estar relacionada, também, a esta alteração, já que o magnésio presente nos piroxênios correspondem a boa parte do magnésio da rocha total.

Ainda com relação ao baixo Mg#, constatou-se que as rochas com Mg# mais baixo apresentaram um aumento da susceptibilidade magnética (SM de 20×10^{-3} a 27×10^{-3} SI), mostrando que houve formação de magnetita durante este processo pós-magmático. A formação de magnetita nos leva a crer que este processo ocorreu a altas temperaturas (campo de estabilidade da magnetita), portanto não deve ser de origem supérgena.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho foi de grande importância considerando-se a escassez de informações petrográficas e do quimismo dos componentes principais das rochas da Província Basáltica do Paraná; e permitiu à aluna o aprendizado com maior profundidade das técnicas de petrografia e de análises químicas de rocha, além de ampliar seus estudos sobre o vulcanismo ácido, evolução de magmas ácidos e seus produtos e dos processos posteriores sofridos pelas rochas vulcânicas ácidas.

Dentre as principais atividades realizadas e resultados obtidos neste trabalho de formatura destacam-se:

1. A caracterização textural das rochas vulcânicas ácidas da região;
2. A identificação da influência das amígdalas na modificação da composição química das rochas vulcânicas ácidas estudadas;
3. A correta caracterização química das rochas vulcânicas ácidas da região e sua classificação, como traquitos e dacitos;
4. A caracterização química das principais fases minerais (plagioclásio, piroxênios, quartzo, feldspato alcalino e titano-magnetita) e do vidro presente na matriz, o que ainda não havia sido realizado em estudos prévios na região;
5. A caracterização do processo de devitrificação da matriz das rochas dos grupos texturais com matriz vítrea ou hipocristalina e sua influência na modificação da composição química (em particular o Mg#) das rochas vulcânicas ácidas da região de Piraju-Ourinhos;
6. O estudo da petrogênese em diagramas de fase utilizando as composições químicas de minerais, matriz e rocha total.

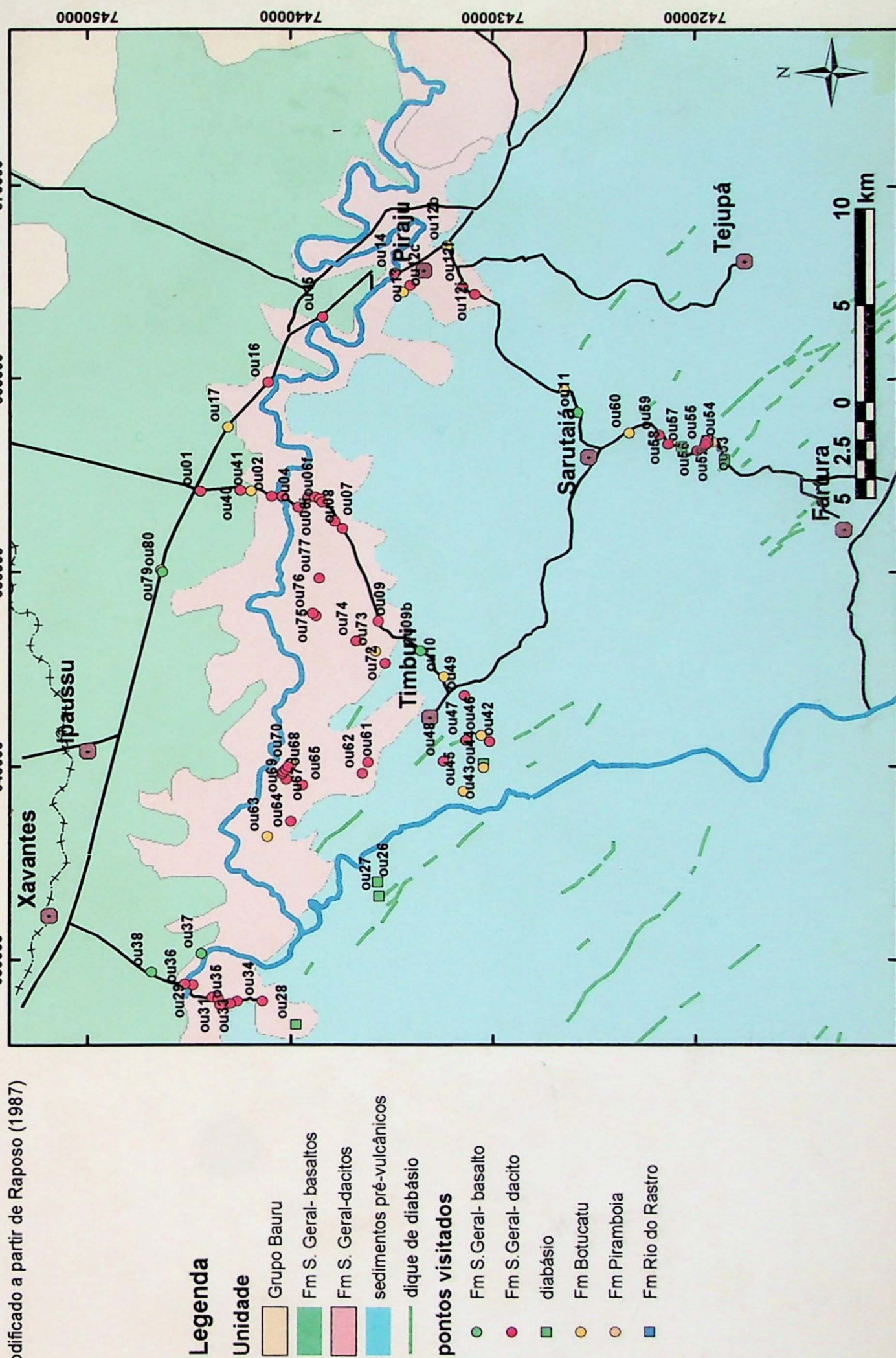
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D., 1986. *Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships*. Journal of Petrology, **27**:915-944.
- Garland, F., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M., 1995. *Description and petrogenesis of the Paraná rhyolites, southern Brazil*. Journal of Petrology **36** (5): 1193-1227.
- Harris, C. & Milner, S., 1997. *Crustal origin for the Paraná rhyolites: Discussion of 'Description and Petrogenesis of the Paraná Rhyolites, Southern Brazil' by Garland et al. (1995)*. Journal of Petrology **38** (2): 299-302.
- Holtz F., Pichavant M., Barbey P. & Johannes W., 1992a. Effects of H₂O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 2 and 5 kbar. *American Mineralogist* **77**: 1223-1241.
- Montanheiro, T.J., 1999. *Prospecção e caracterização de pozolanas na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP, 226 pp.
- Raposo, M.I., 1987. *Evolução magmática e petrológica das rochas vulcânicas ácidas Mesozóicas da região de Piraju-Ourinhos (SP e PR)*. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, 159 pp.

- Sartori, P.L.; Maciel Filho, C.M. & Menegotto, E., 1975. *Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas da Bacia do Paraná na região de Santa Maria, RS*. Revista Brasileira de Geociências, **5**: 141-159.
- Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L., Mantovani, M., 1996. 3-D, $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology in the Paraná continental flood basalt province. Earth and Planetary Science Letters, **143**:95-109.
- Thompson, A.B., 1996. *Fertility of crustal rocks during anatexis*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, **87**, 1-10.
- Turner, S, Regelous, M, Kelley, S, Hawkesworth, C, Mantovani, M. 1994. *Magmatism and Continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology*. Earth and Planetary Science Letters, **121**:333-348.
- Tuttle, O.F. & Bowen, N.L. 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. *Geological Society of America Memoir*, **74**: 153 p.
- Wen, S. & Nekvasil, H. (1994) SOLVCALC: An interactive graphics package for ternary feldspar calculations and geothermometry. *Computers & Geoscience* **20**, No. 6, 1025-1040.

Figura 1. Esboço geológico da área de ocorrência das rochas vulcânicas ácidas, região de Piraju-Ourinhos (SP)

modificado a partir de Raposo (1987)



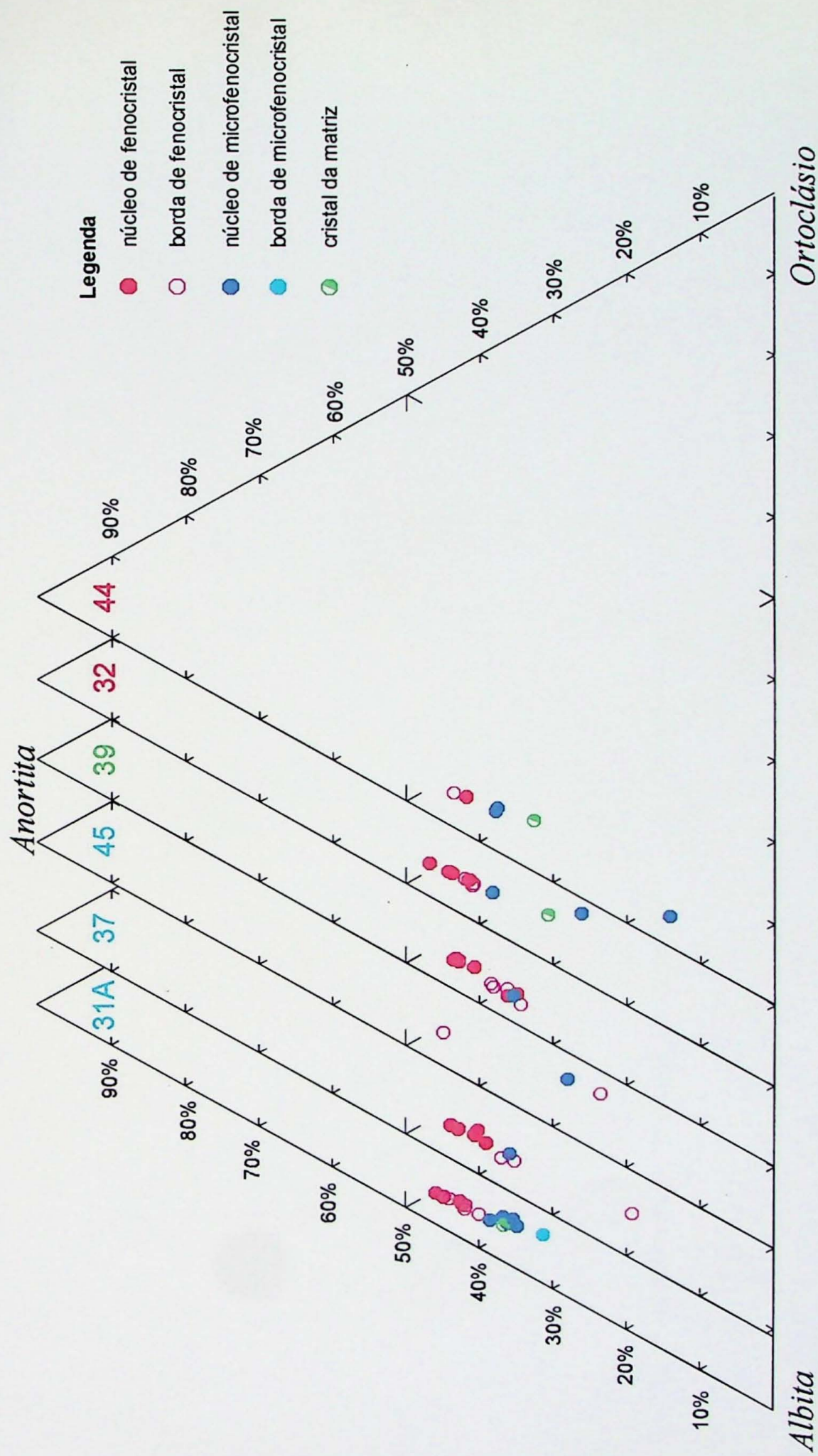


Figura 2. Diagramas An-Ab-Or com as composições químicas dos plagioclásios das amostras pertencentes aos Grupos 1, 2 e 3. Os números em vermelho no topo dos diagramas representam as amostras do Grupo 1, os números em azul representam as amostras do Grupo 2 e o número em verde representa a amostra do Grupo 3.

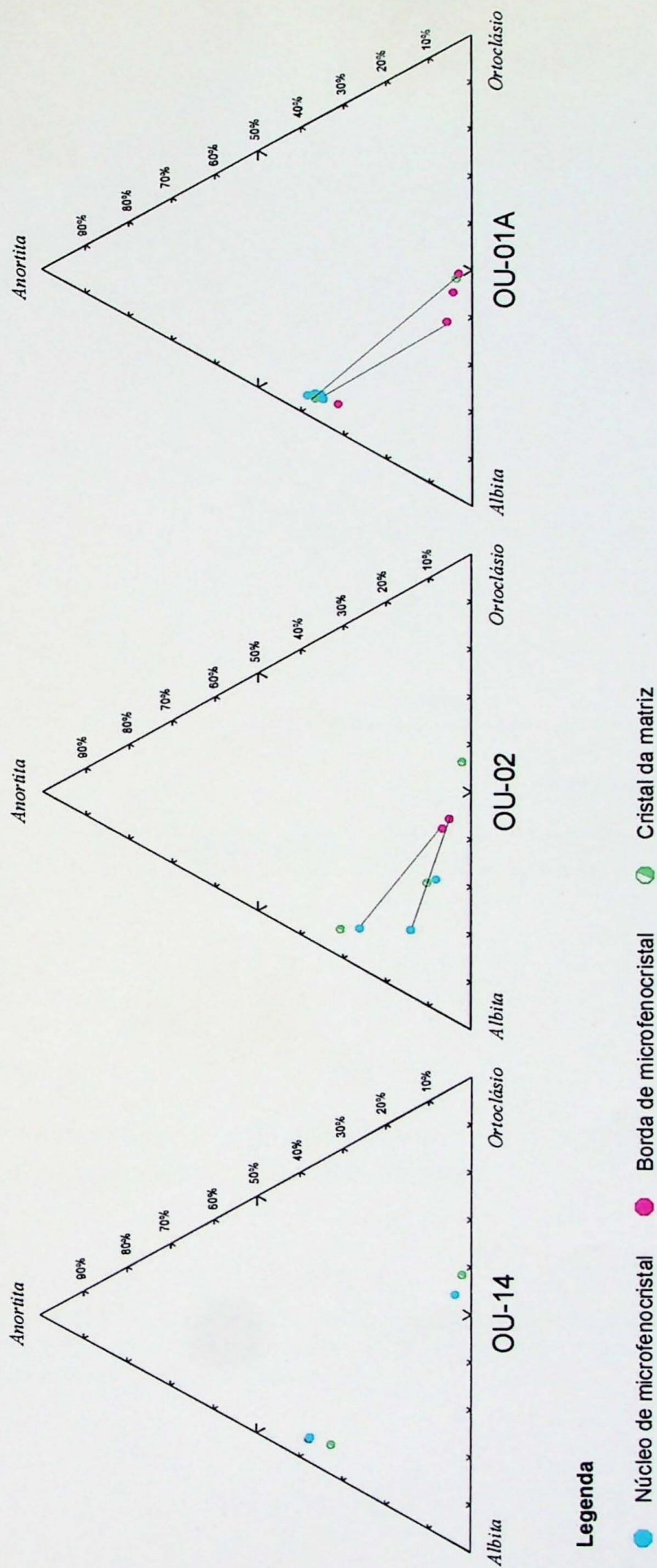
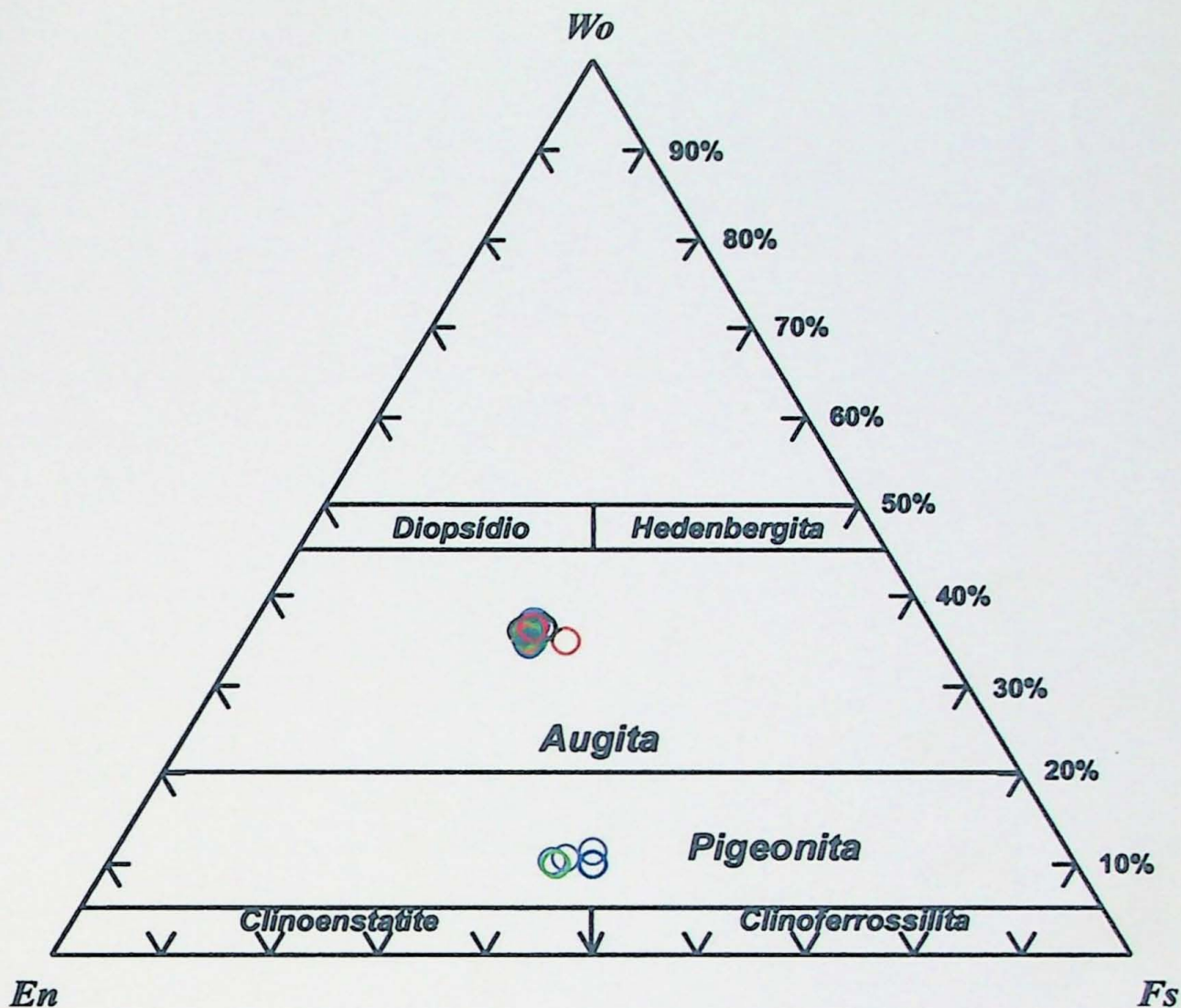


Figura 3. Gráficos com composições de microfenocristais de feldspatos alcalinos, onde as linhas ligam composições químicas de núcleo e borda de microfenocristais.



Legenda

- | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| ○ Amostra OU-01A | ○ Amostra OU-02 | ○ Amostra OU-07 | ○ Amostra OU-14 |
| ○ Amostra OU-32 | ○ Amostra FTM-259 | | |

Figura 4. Diagrama Wo-En-Fs com análises de fenocristais e microfenocristais de piroxênios de amostras do Grupo 1 e Grupo 2. As amostras concentraram-se nos campos da augita e da pigeonita.

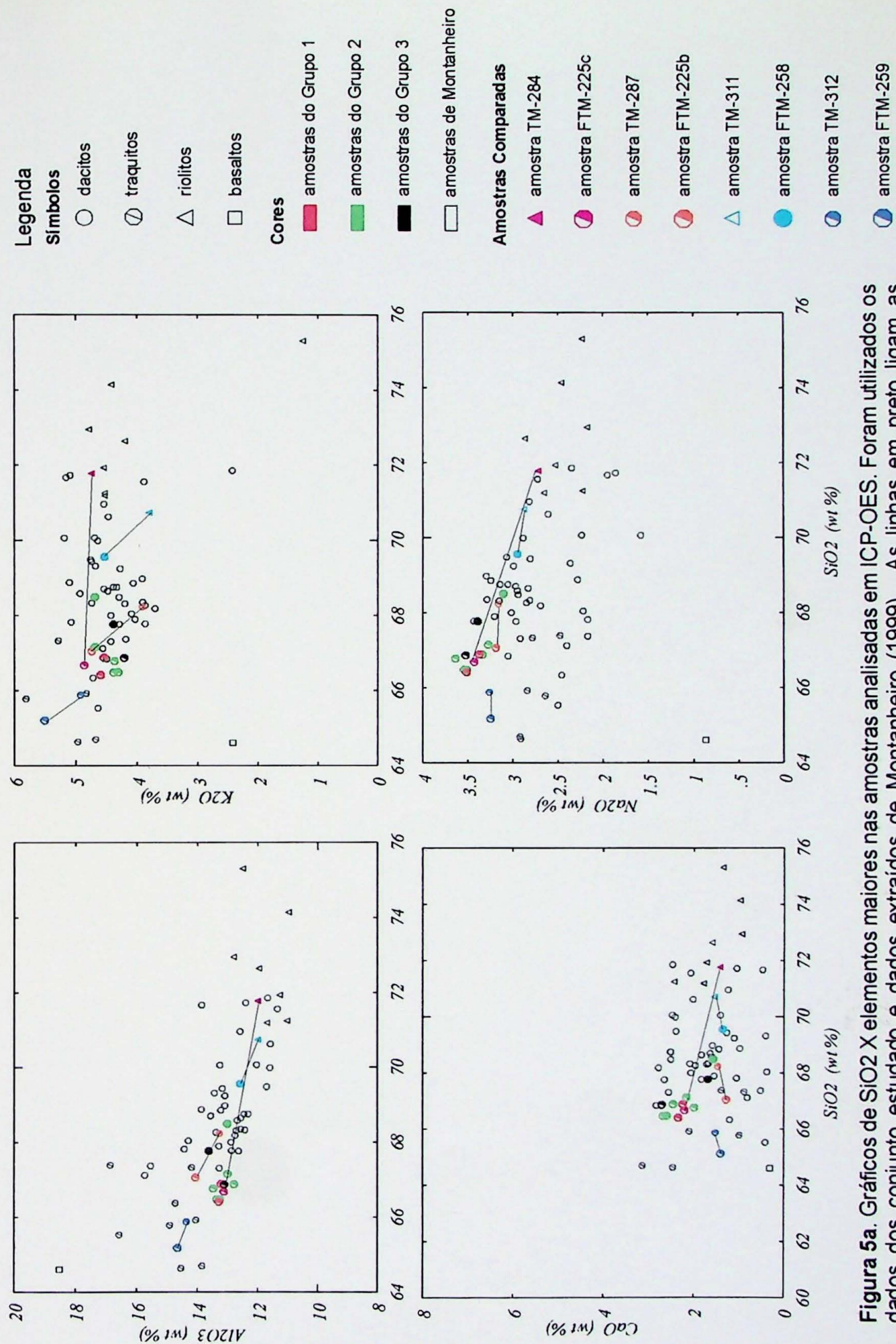
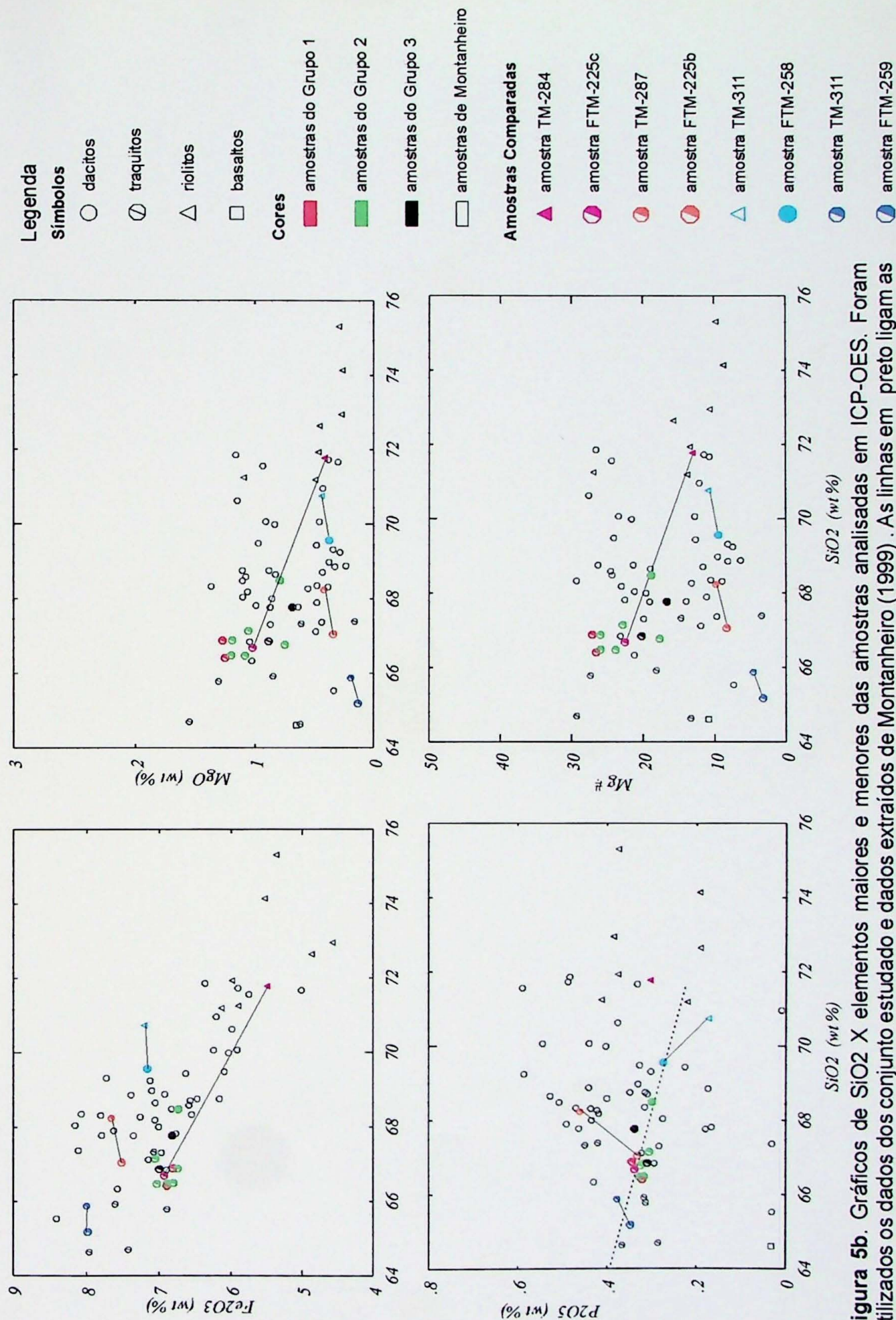


Figura 5a. Gráficos de SiO₂ X elementos maiores nas amostras analisadas em ICP-OES. Foram utilizados os dados do conjunto estudado e dados extraídos de Montanhaeiro (1999). As linhas em preto ligam as composições das amostras reanalisadas pela aluna às analisadas por Montanhaeiro.



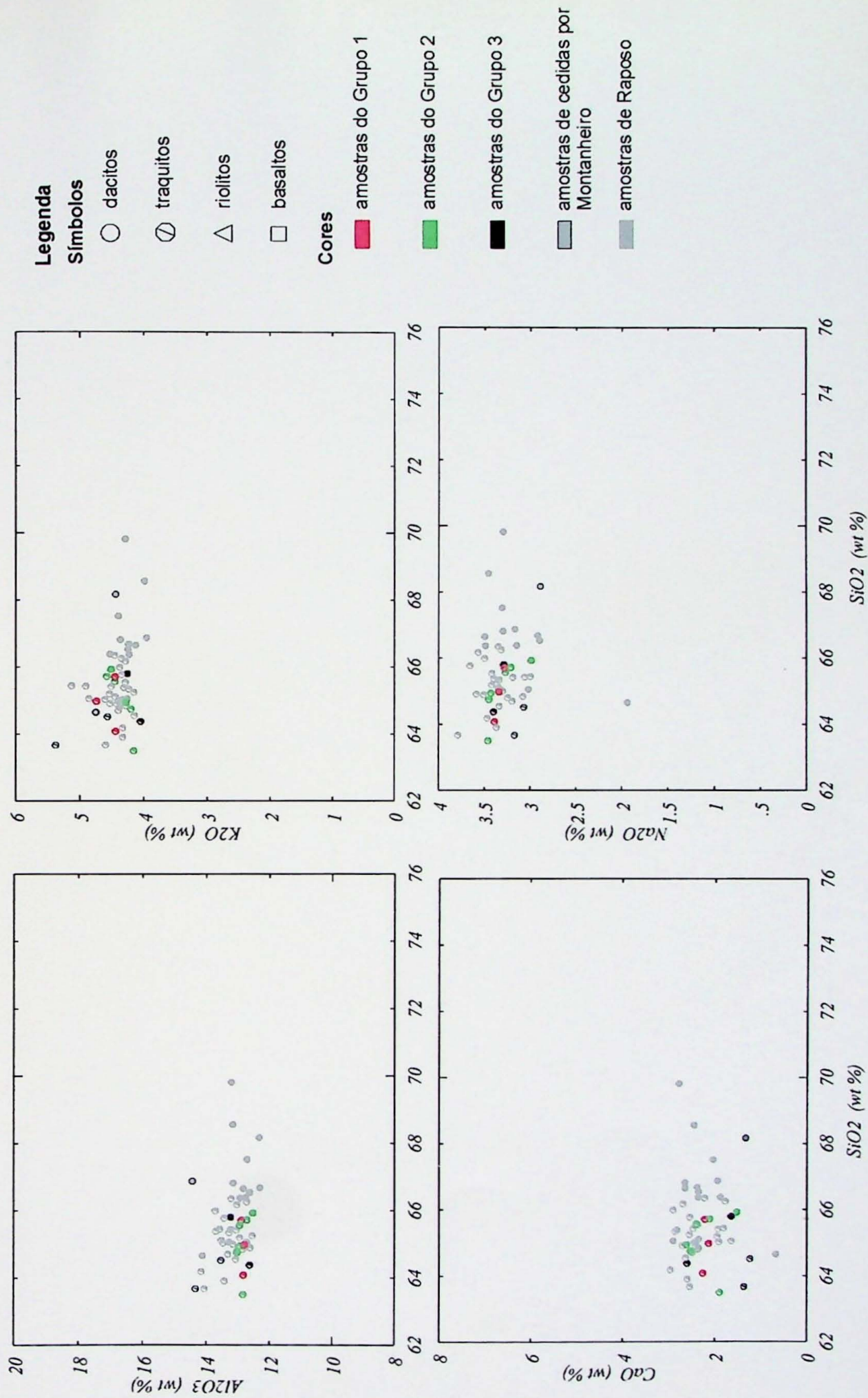


Figura 6a. Gráficos de SiO₂ X elementos maiores das amostras analisadas em ICP-OES. Foram utilizados os dados do conjunto estudado e dados extraídos de Raposo (1987).

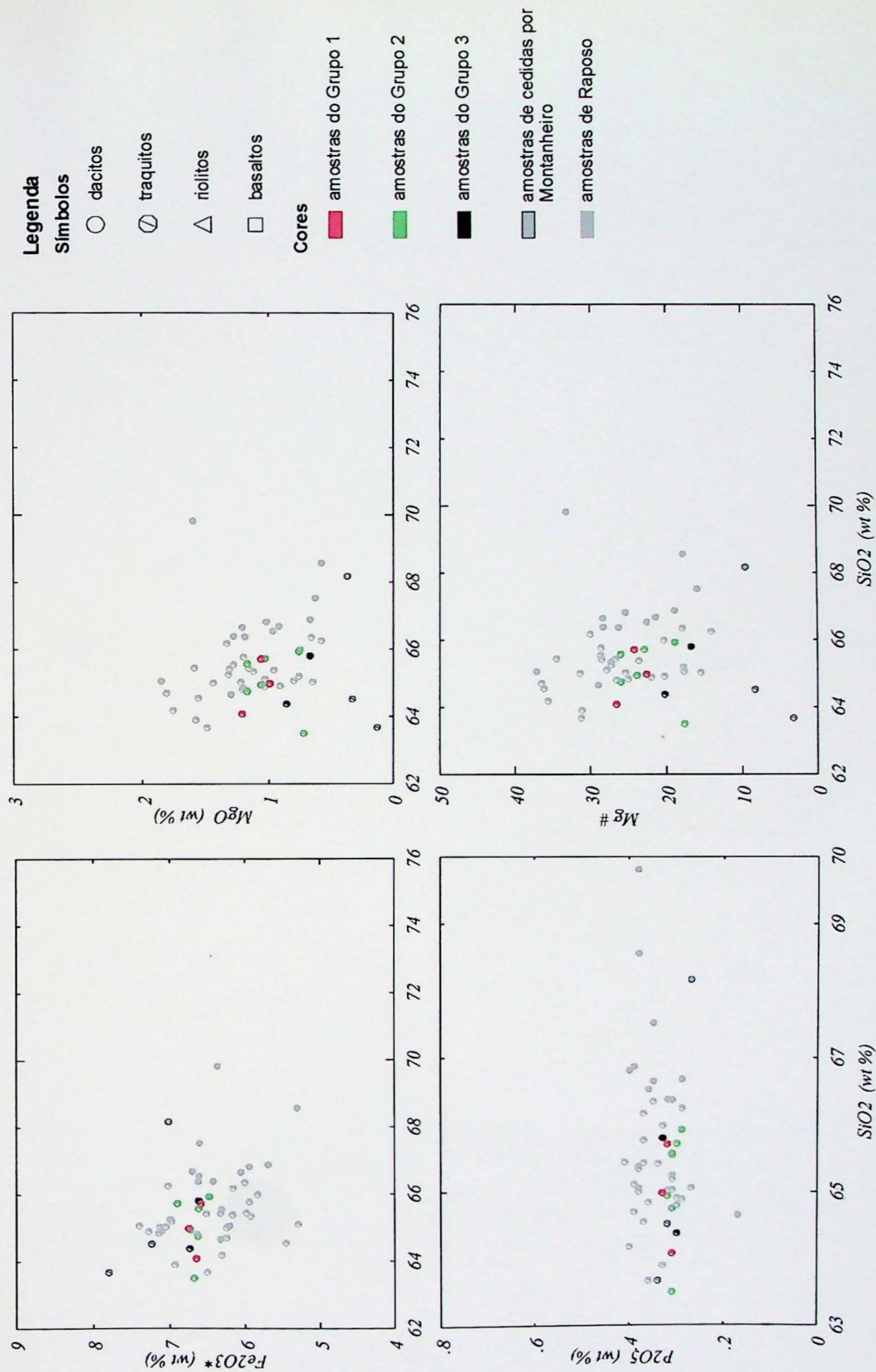


Figura 6b. Gráficos de SiO_2 X elementos maiores e menores das amostras analisadas em ICP-OES. Foram utilizados os dados do conjunto estudado e dados extraídos de Raposo (1987).

Le Maitre 1989

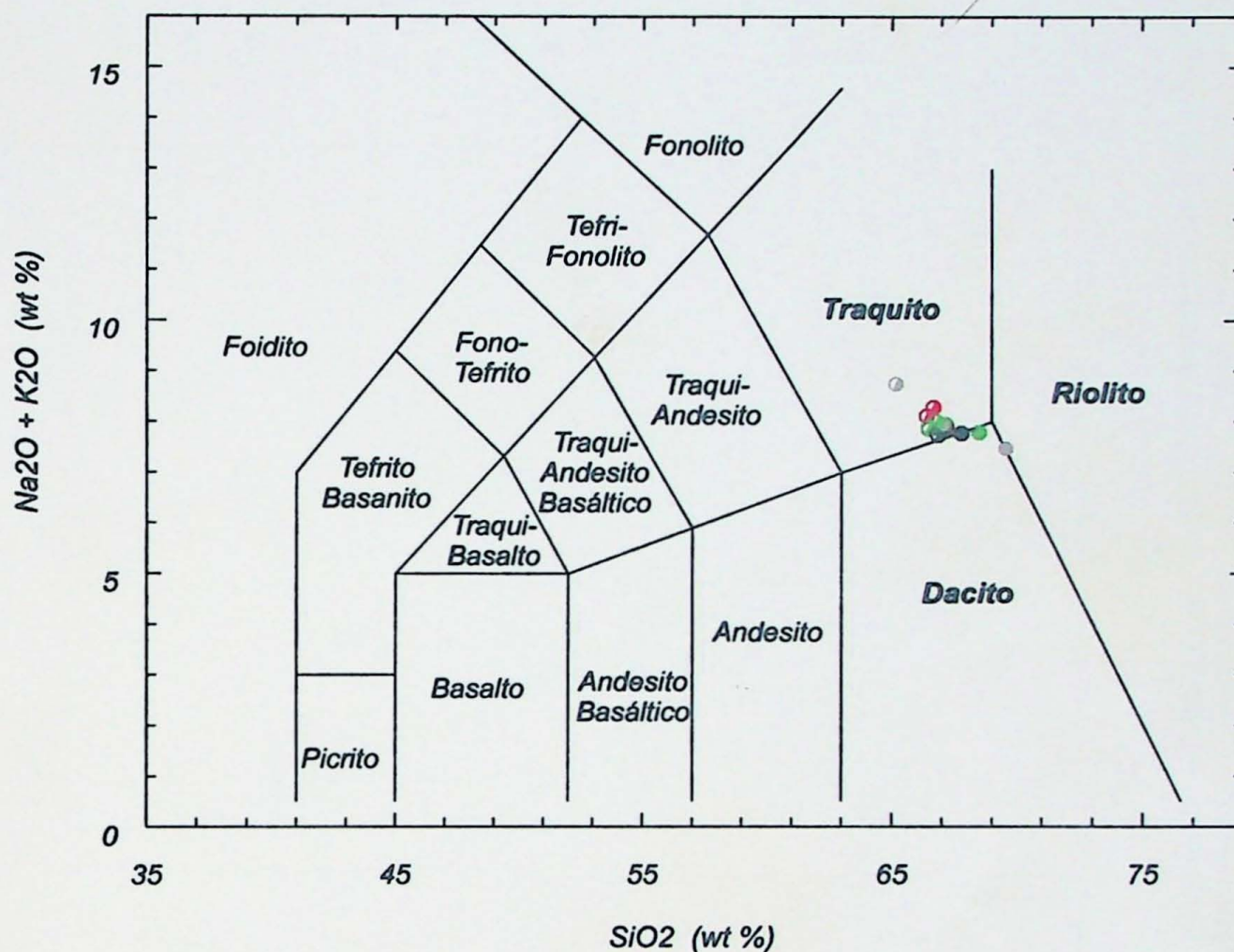


Figura 7. Distribuição das amostras estudadas no diagrama Sílica-Álcali-Total, proposto por Le Maitre (1989). Os símbolos em vermelho, verde e preto, representam as amostras do Grupo 1, Grupo 2 e Grupo 3 respectivamente; já os símbolos em cinza representam as amostras preparadas previamente por Montanheiro e cedidas para reanálise.

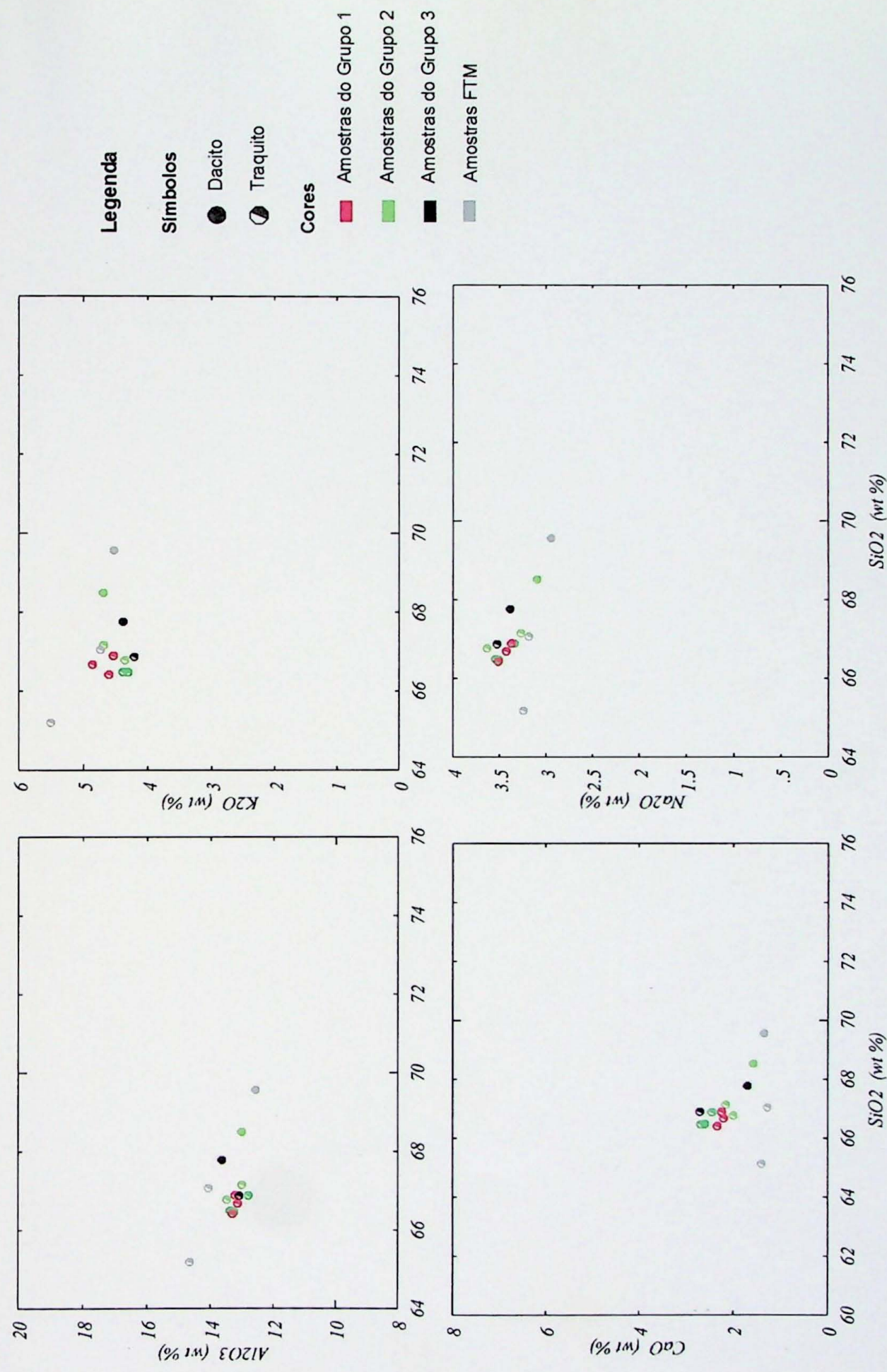


Figura 8a. Gráficos de SiO₂ X elementos maiores nas amostras analisadas em ICP-OES. Os símbolos em cinza são referentes às amostras FTM pulverizadas previamente por Montanhiero e que foram reanalisadas pela aluna.

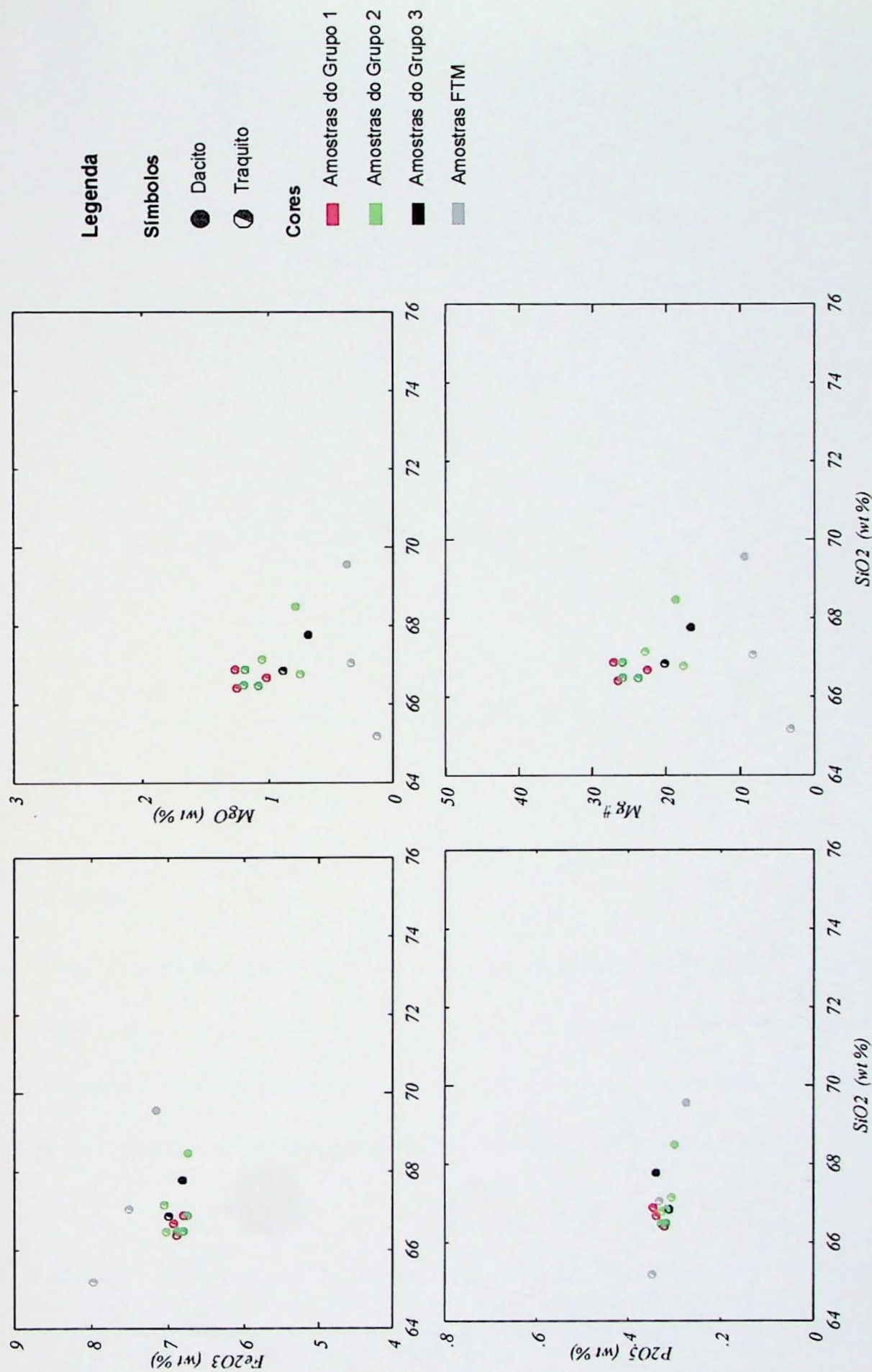
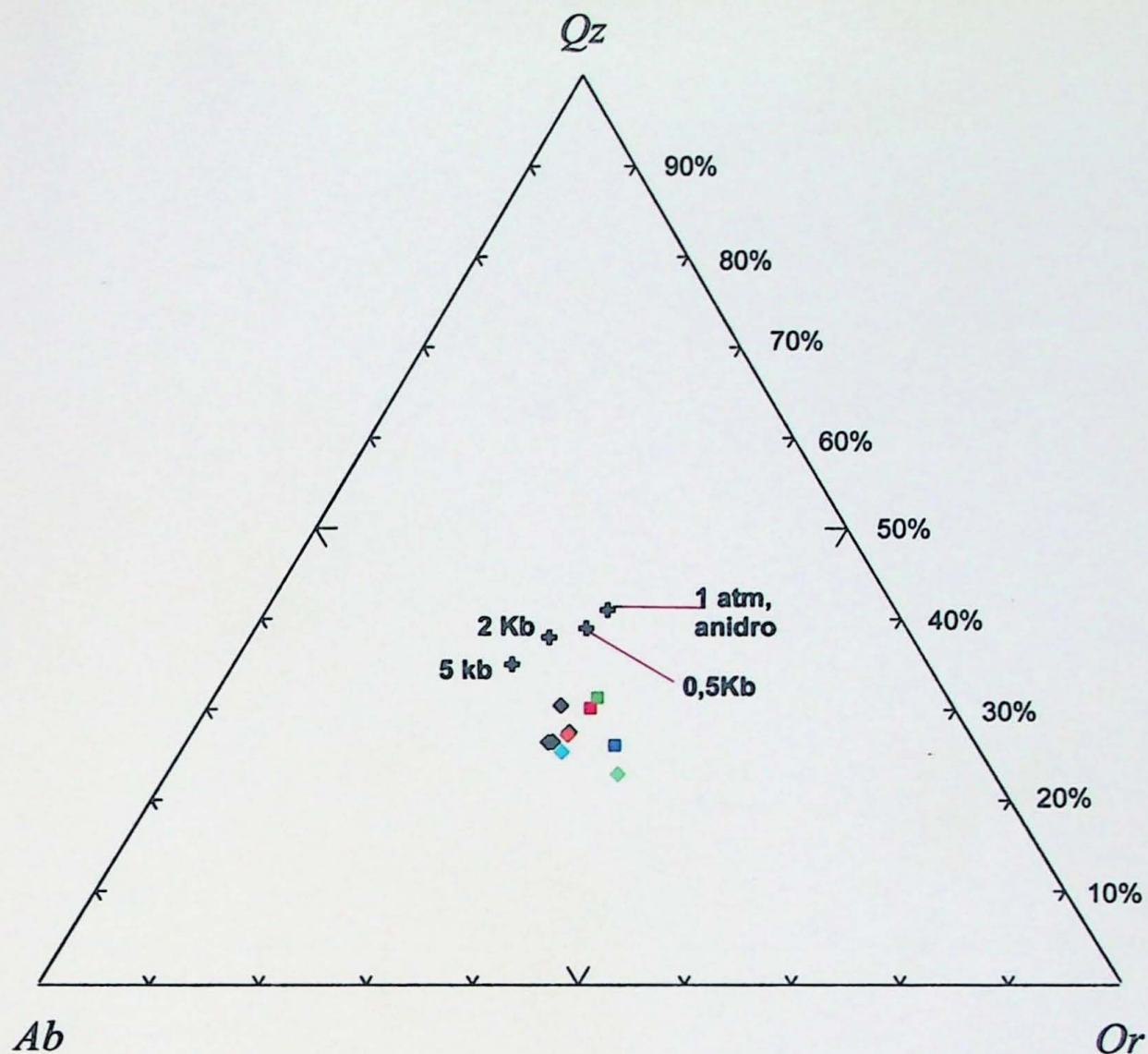


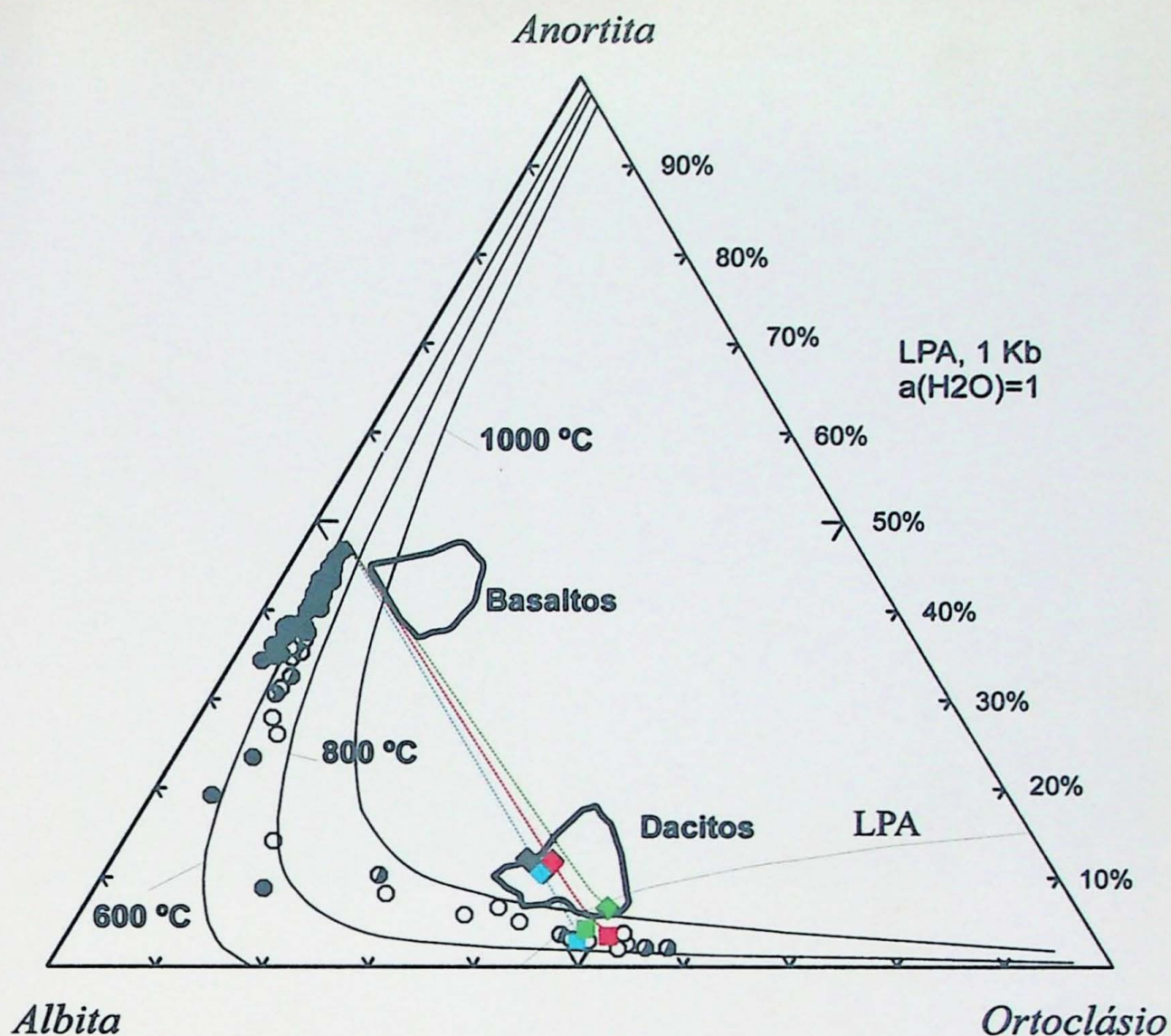
Figura 8b. Gráficos de SiO₂ X elementos maiores e menores nas amostras analisadas em ICP-OES. Os símbolos em cinza são referentes às amostras pulverizadas previamente por Montanhiero e que foram reanalisadas pela aluna.



Legenda

- | | |
|---|--|
| ◆ composição da amostra OU-02 | ■ composição média do vidro da amostra OU-02 |
| ◆ composição da amostra OU-14 | ■ composição média do vidro da amostra OU-14 |
| ◆ composição da amostra FTM-259 | ■ composição média do vidro da amostra FTM-259 |
| ◆ composições das amostras dos grupos 2 e 3 | + pontos mínimos graníticos |

Figura 9. Diagrama Qz-Ab-Or com as composições químicas das amostras do conjunto estudado (rocha total e matriz vítrea), e os pontos mínimos graníticos em condições hidratadas, exceto quando indicado, a pressões de 1 atm, 0,5 Kb e 2 Kb (Tuttle & Bowen, 1958), e a 5 Kb (Holtz, *et. al.*, 1992).



Legenda

- | | |
|---|--|
| ■ composição química da matriz da amostra OU-02 | ● fenocristal |
| ■ composição química da matriz da amostra OU-14 | ○ microfenocristal |
| ■ composição química da matriz da amostra FTM-259 | ● cristal da matriz |
| ◆ composição química da amostra OU-02 | ◆ composição química das amostras dos grupos 2 e 3 |
| ◆ composição química da amostra OU-14 | |
| ◆ composição química da amostra FTM-259 | |

Figura 10. Gráfico An-Ab-Or com dados de análises químicas de feldspatos e matriz vítrea das rochas vulcânicas ácidas de Piraju-Ourinhos. As curvas de solvus a diferentes temperaturas estão situadas à esquerda do diagrama, os campos dacitos e basaltos representam as análises químicas das rochas da região realizadas por Montanheiro (1999), LPA é a linha de co-precipitação de plagioclásio e feldspato alcalino (Thompson, 1996) e as linhas em azul, vermelho e verde representam os possíveis caminhos de fracionamento do magma.

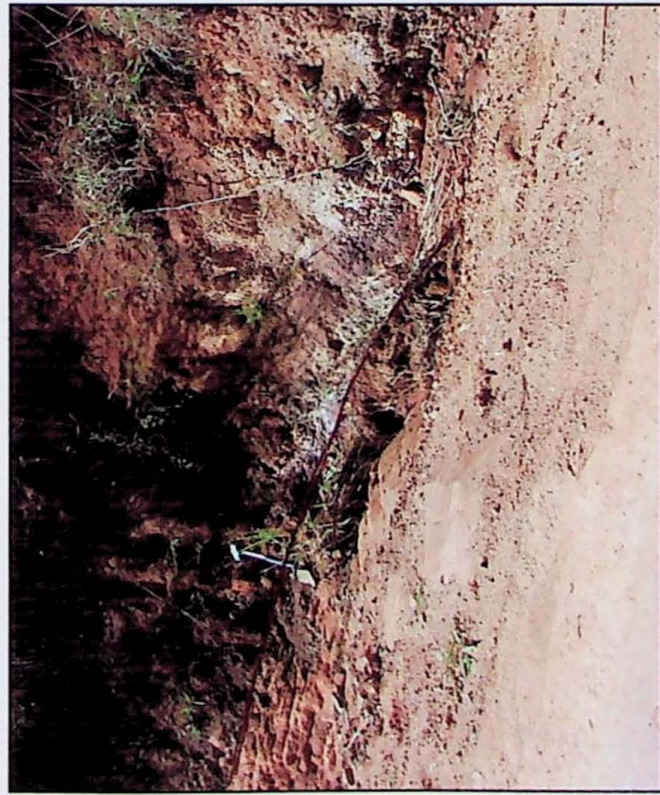


Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4



Foto 5



Foto 6

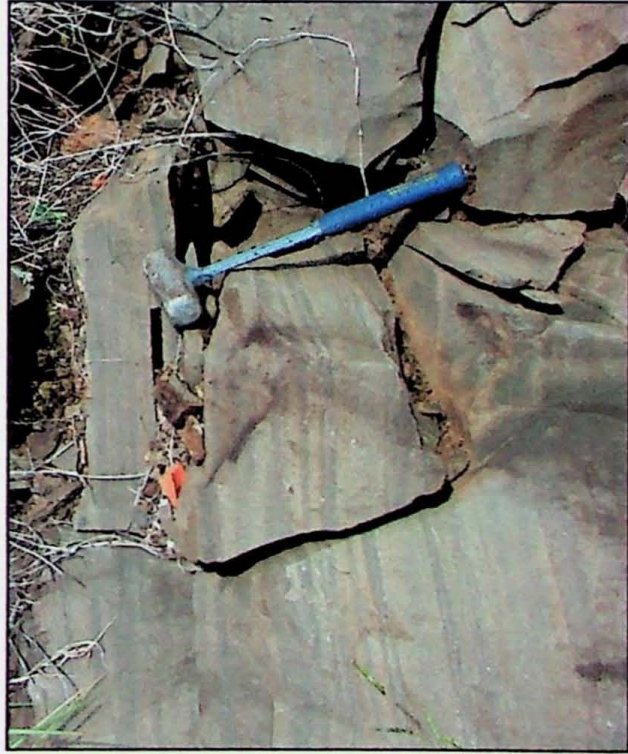


Foto 7



Foto 8

Legenda das Fotos de Campo

Foto 1. Contato de rocha vulcânica ácida da Fm Serra Geral com arenitos da Fm Botucatu, na região de Timburi. A rocha vulcânica ácida está alterada (em tons arroxeados na base) e encontra-se sobre o arenito (tons claros, no chão, parte inferior esquerda da foto), em contato inclinado. Afloramento OU-49, ao sul de Timburi.

Foto 2. Corpo intrusivo de rocha ácida (à direita, porção mais clara) em arenitos Botucatu. O contato é subvertical na metade inferior do afloramento, e se abre na parte superior, como ressaltado à caneta. Afloramento OU-58, na Serra da Fartura.

Foto 3. Aspecto da rocha vulcânica ácida vítrea e amigdaloidal pertencente ao Grupo 1. Afloramento OU-67, na região de Timburi (perfil na Rod. Ver. José Arthur dos Reis Filho)

Foto 4. Afloramento de rochas vulcânicas ácidas com forte deslocamento sub-horizontal provocado pelo resfriamento das rochas do derrame. Ponto OU-66, na região de Timburi (perfil na Rod. Ver. José Arthur dos Reis Filho)

Foto 5. Rocha vulcânica ácida com bandamento secundário vertical, pertencente ao Grupo 2. Afloramento OU-65, na região de Timburi (perfil na Rod. Ver. José Arthur dos Reis Filho)

Foto 6. Bandamento paralelo ao deslocamento sub-horizontal em rocha vulcânica ácida do Grupo 2. Afloramento OU-66.

Foto 7. Aspecto geral de rocha vulcânica ácida pertencente ao Grupo 2, destacando forte bandamento. Afloramento OU-36, perfil da região de Xavantes.

Foto 8. Detalhe do bandamento da rocha. Nota-se que o bandamento está relacionado a fraturas preenchidas por hematita. Afloramento OU-36.



Foto 9



Foto 10



Foto 11

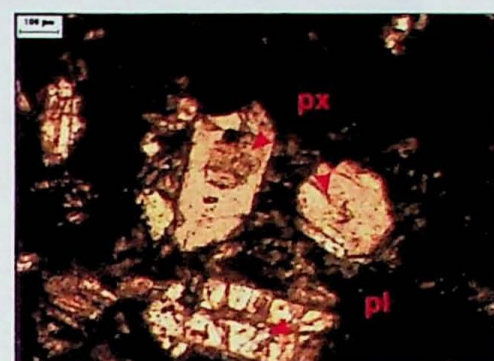


Foto 12

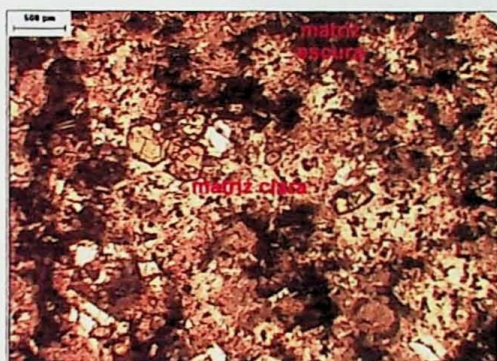


Foto 13



Foto 14

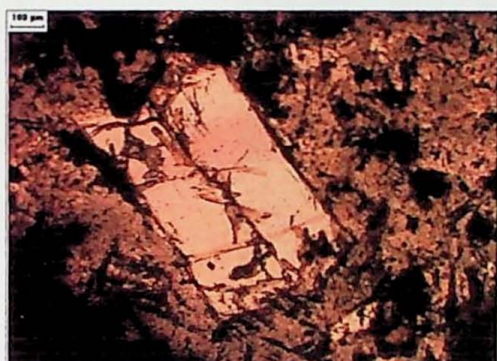


Foto 15



Foto 16

- Foto 9.** Matriz vítrea com aglomerados de opacos e fenocristais de plagioclásio, em rocha do Grupo 1. Lâmina OU-14.
- Foto 10.** Matriz vítrea com fenocristais em rocha do Grupo 1. Lâmina OU-14.
- Foto 11.** Fenocristal de plagioclásio geminado incluído na matriz vítrea de rocha do Grupo 1. Lâmina OU-02
- Foto 12.** Matriz vítrea de rocha do Grupo 1 com fenocristais de piroxênio e plagioclásio. Lâmina OU-02.
- Foto 13.** Aspecto da matriz hipocristalina com fenocristais, de rocha do Grupo 2. Lâmina OU-15.
- Foto 14.** Microfenocristal com hábito "rabo de andorinha" em rocha do Grupo 2. Lâmina OU-01a.
- Foto 15.** Fenocristal de plagioclásio na matriz hipocristalina de rocha do Grupo 3. Lâmina OU-15.
- Foto 16.** Fenocristal de piroxênio na matriz hipocristalina de rocha do Grupo 3. Lâmina OU-15.

Microfotografias digitais obtidas em microscópio óptico, em luz refletida com nicóis paralelos, com exceção da microfotografia 11 que foi obtida com os nicóis cruzados.

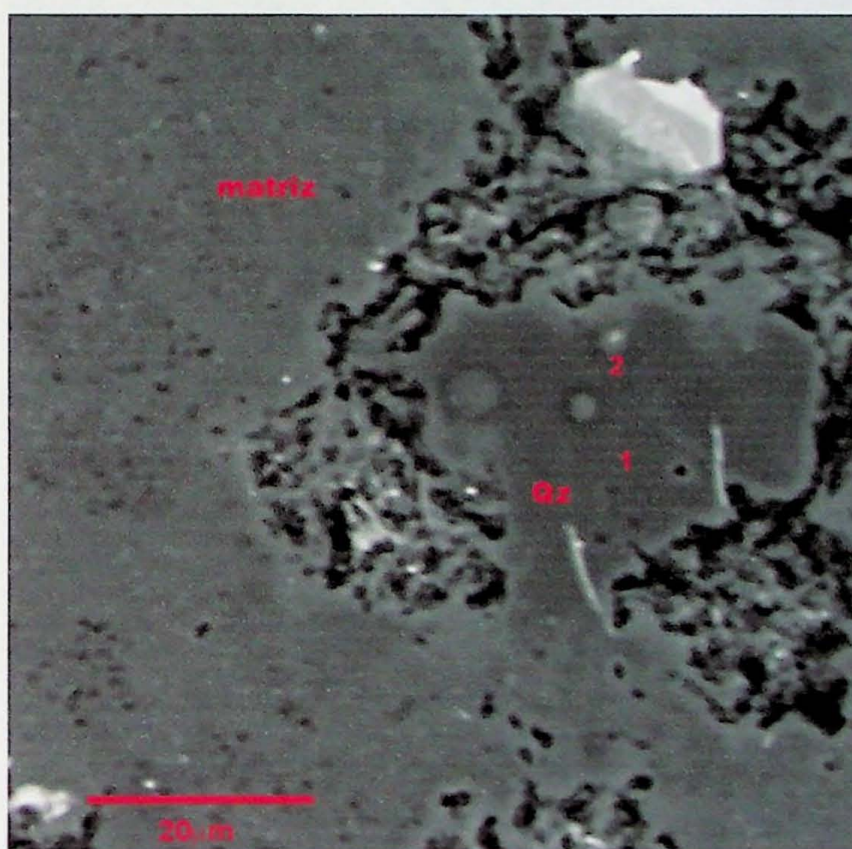
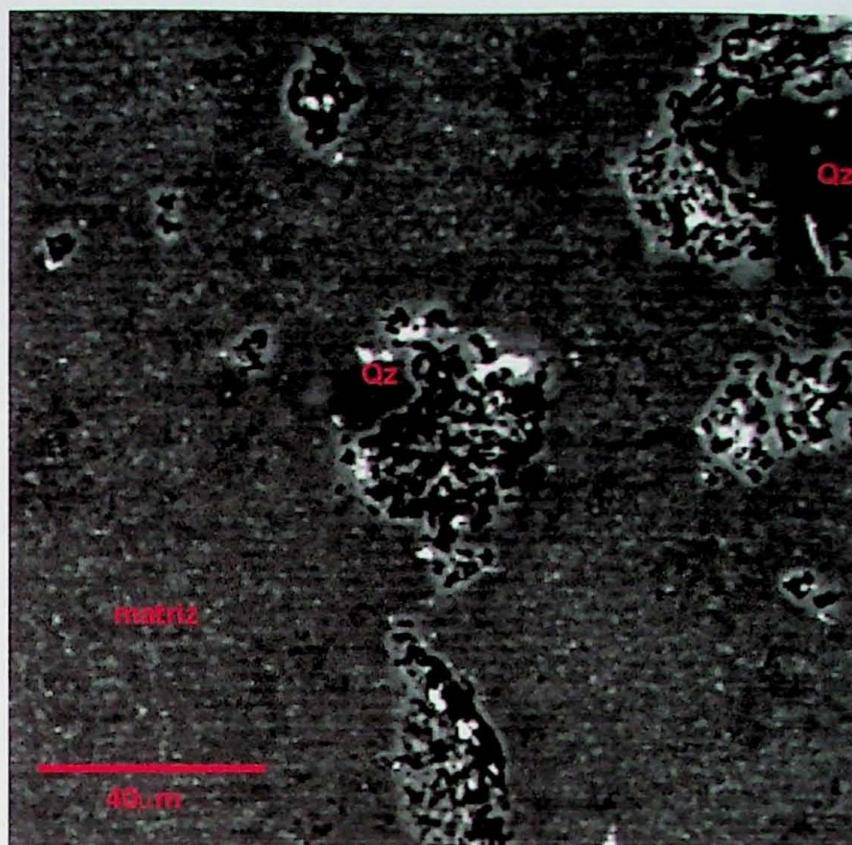


Foto 17. Imagens obtidas por elétrons retroespalhados da amostra OU-14. A imagem superior mostra cristais de quartzo em meio a matriz vítrea e a imagem inferior mostra um cristal de quartzo em detalhe. Os números representam pontos onde foram realizadas análises por EDS.

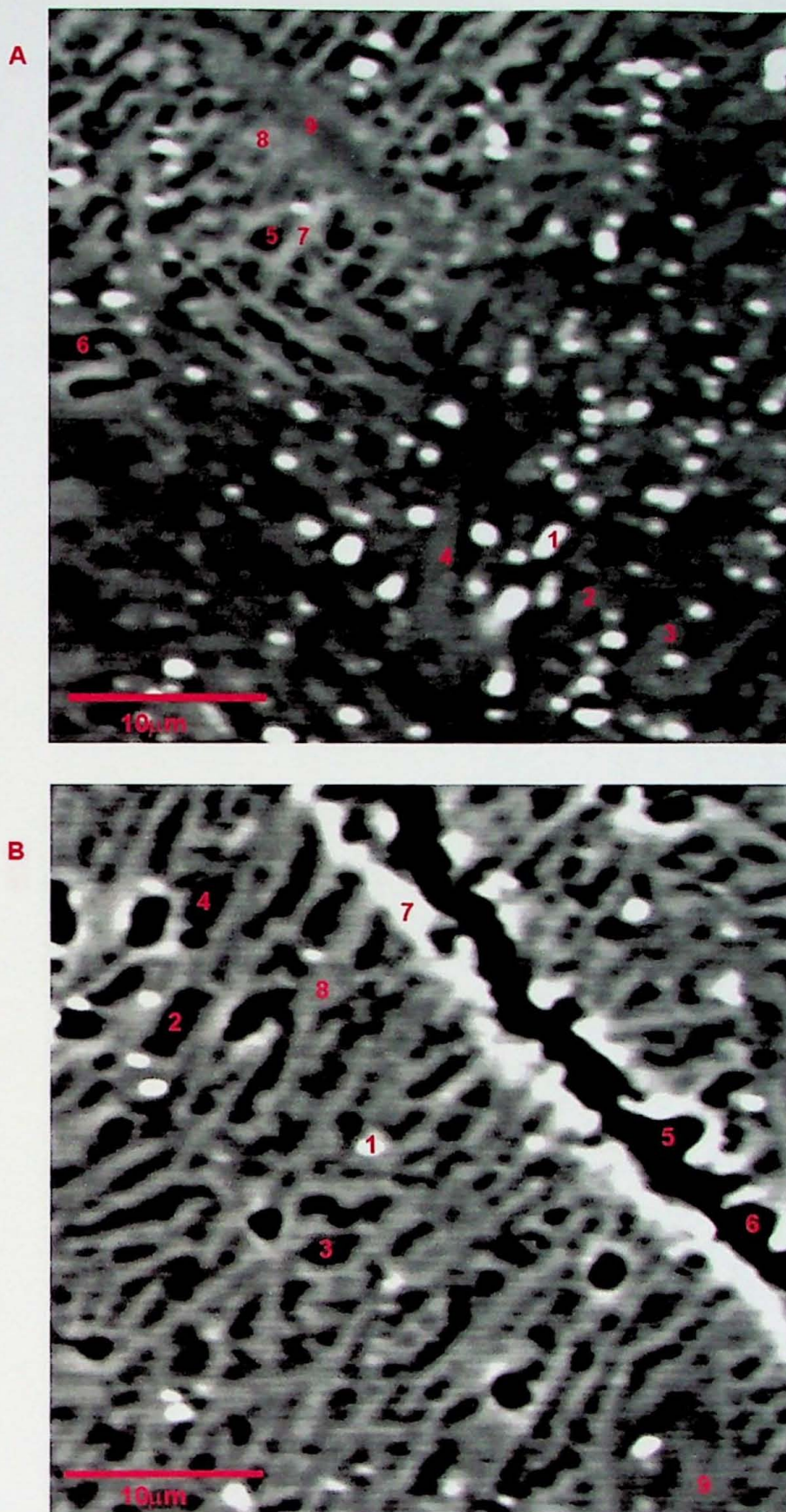


Foto 18. Imagens obtidas por elétrons retroespalhados mostrando a matriz vítrea da amostra OU-02. As áreas claras possuem alto número atômico médio e são ricas em ferro, já as áreas escura têm baixo número atômico médio e são ricas em sílica. Os números representam os pontos onde foram realizadas análises em microsonda eletrônica por EDS.

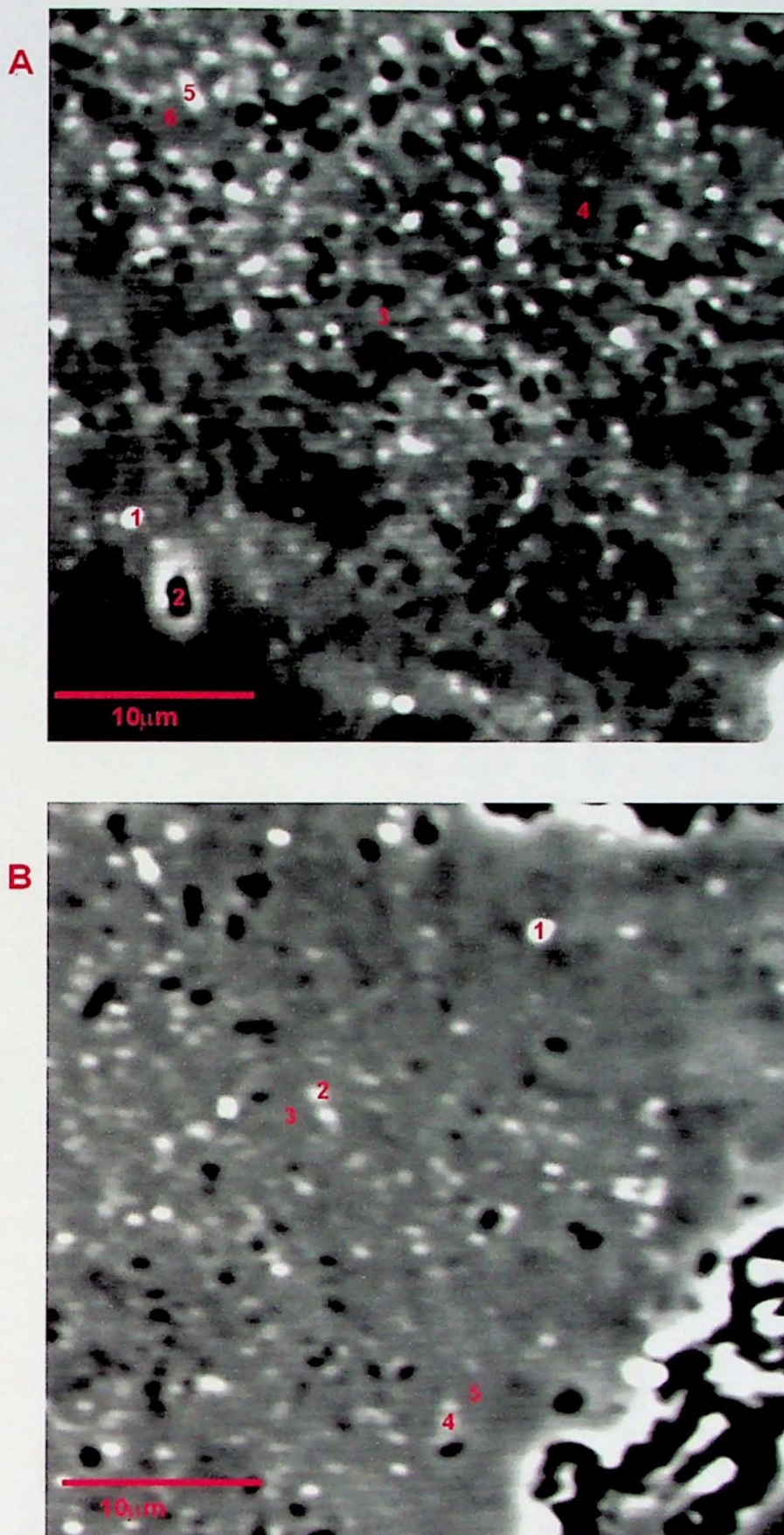


Foto 19. Imagens obtidas por elétrons retroespalhados mostrando a matriz vítrea da amostra OU-14. As áreas claras possuem alto número atômico médio e são ricas em ferro, já as áreas escura têm baixo número atômico médio e são ricas em sílica. Os números representam os pontos onde foram realizadas análises em microsonda eletrônica por EDS.

Tabela 1. Análises químicas dos plagioclásios obtidas em microsonda eletrônica por WDS

Amostra	Tipo de cristal	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Ab	Or
OU-01A	microfenocristal núcleo	58.54	0.10	25.16	0.62	0.01	0.04	7.68	6.32	0.70	99.16	52.25	42.98	4.78
OU-01A	fenocristal núcleo	56.83	0.06	25.75	0.67	0.00	0.09	8.99	5.90	0.71	98.99	57.62	37.83	4.55
OU-01A	fenocristal borda	57.88	0.16	25.66	0.70	0.00	0.04	8.10	6.22	0.71	99.45	53.90	41.38	4.72
OU-02	fenocristal borda	57.71	0.04	26.15	0.67	0.00	0.06	9.32	5.39	0.69	100.04	60.48	35.02	4.50
OU-02	fenocristal núcleo	56.59	0.08	26.60	0.66	0.00	0.07	8.25	6.09	0.73	99.07	54.76	40.42	4.81
OU-02	fenocristal borda	58.07	0.02	26.15	0.72	0.00	0.06	8.86	5.70	0.75	100.32	57.90	37.23	4.87
OU-02	microfenocristal	57.94	0.02	25.25	0.60	0.00	0.03	7.96	6.32	0.81	98.94	52.71	41.89	5.40
OU-02	fenocristal núcleo	57.38	0.09	25.68	0.76	0.02	0.06	8.55	5.94	0.81	99.28	55.86	38.85	5.28
OU-07	fenocristal núcleo	57.10	0.09	25.43	0.62	0.00	0.07	8.28	6.02	0.76	98.37	54.96	39.97	5.07
OU-07	fenocristal borda	62.67	0.16	22.24	0.41	0.01	0.00	4.09	8.52	0.97	99.07	30.13	62.76	7.11
OU-07	fenocristal núcleo	56.39	0.03	26.15	0.55	0.02	0.08	8.73	5.73	0.69	98.38	57.59	37.83	4.58
OU-07	fenocristal borda	58.15	0.10	25.16	0.56	0.01	0.03	7.46	6.63	0.61	98.70	50.74	45.12	4.14
OU-09	fenocristal núcleo	58.38	0.07	24.31	0.63	0.00	0.02	7.13	6.70	0.63	97.87	49.33	46.34	4.34
OU-09	fenocristal borda	59.19	0.06	24.50	0.49	0.02	0.01	6.99	6.98	0.46	98.69	48.43	48.37	3.20
OU-09	fenocristal núcleo	57.06	0.41	25.37	0.55	0.05	0.00	8.47	6.05	0.69	98.65	55.67	39.79	4.54
OU-09	fenocristal borda	56.37	0.43	25.79	0.64	0.00	0.01	8.86	5.85	0.66	98.61	57.65	38.07	4.29
OU-09	microfenocristal núcleo	59.04	0.07	24.54	0.49	0.04	0.00	7.32	6.76	0.55	98.81	50.06	46.21	3.73
OU-14	microfenocristal núcleo	58.17	0.04	25.75	0.63	0.00	0.05	7.70	6.45	0.83	99.61	51.40	43.06	5.54
OU-14	fenocristal núcleo	56.47	0.06	25.44	0.73	0.00	0.08	8.82	5.84	0.78	98.21	57.13	37.84	5.03
OU-14	fenocristal borda	56.11	0.04	26.01	0.67	0.01	0.07	9.18	5.75	0.72	98.56	58.65	36.74	4.60

Tabela 2. Análises químicas dos feldspatos alcalinos obtidas em microsonda eletrônica por WDS

Amostra	Tipo de cristal	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Ab	Or
OU-01A	rabão de andorinha borda	65.94	0.11	19.19	0.33	0.05	0.00	1.15	6.22	5.91	98.89	8.68	46.86	44.46
OU-01A	cristal oco	67.74	0.08	17.95	0.39	0.05	0.01	0.69	5.06	7.17	99.13	5.32	39.18	55.50
OU-01A	rabão de andorinha borda	65.14	0.12	19.23	0.33	0.01	0.00	0.94	5.65	7.19	98.62	6.86	40.97	52.17
OU-01A	rabão de andorinha borda	66.31	0.02	18.93	0.21	0.00	0.00	0.63	5.35	7.91	99.35	4.56	38.50	56.94
OU-32	rabão de andorinha núcleo	64.72	0.09	19.68	0.74	0.00	0.07	1.65	7.03	4.58	98.55	12.42	53.05	34.53
OU-32	microcristal	67.76	0.12	17.64	0.43	0.00	0.00	0.42	4.40	8.67	99.43	3.09	32.61	64.30
OU-32	cristal da matriz	64.95	0.03	20.37	0.58	0.00	0.03	2.02	6.86	4.21	99.05	15.41	52.41	32.18
OU-32	rabão de andorinha borda	67.50	0.39	16.57	1.67	0.00	0.29	1.13	5.04	5.50	98.09	9.72	43.15	47.13
OU-32	rabão de andorinha borda	66.33	0.39	18.57	1.29	0.00	0.15	0.97	5.51	6.61	99.80	7.39	42.12	50.50
OU-32	rabão de andorinha núcleo	64.26	0.12	21.38	0.51	0.09	0.01	2.86	8.02	2.35	99.60	21.62	60.59	17.79
OU-44	microcristal	69.71	0.09	16.41	0.81	0.00	0.09	0.38	3.89	8.40	99.77	3.03	30.72	66.25
OU-44	rabão de andorinha núcleo	65.69	0.13	18.36	1.68	0.02	0.07	0.71	4.49	8.15	99.31	5.35	33.63	61.03

Tabela 3. Análises químicas de piroxênios obtidas em microsonda por WDS.

Amostra	Tipo de cristal	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Total	Mg#
OU-01A	fenocristal borda	50.06	0.54	1.01	17.54	0.71	11.84	16.59	0.20	98.51	54.58
OU-01A	fenocristal núcleo	50.11	0.65	1.25	15.88	0.55	13.21	16.77	0.20	98.62	59.72
OU-01A	microfenocristal borda	50.64	0.67	1.18	15.70	0.64	13.17	17.16	0.22	99.38	59.92
OU-01A	microfenocristal núcleo	50.38	0.69	1.31	15.42	0.67	13.17	17.07	0.20	98.90	60.35
OU-02	fenocristal borda	50.47	0.68	1.30	15.72	0.60	12.97	17.17	0.24	99.14	59.52
OU-02	fenocristal núcleo	50.23	0.70	1.26	15.70	0.62	13.19	16.98	0.22	98.90	59.95
OU-02	núcleo reliquiar	50.63	0.58	1.22	15.93	0.68	13.23	16.71	0.23	99.21	59.67
OU-02	microfenocristal borda	50.49	0.33	0.64	26.84	1.03	15.51	4.83	0.06	99.73	50.73
OU-02	microfenocristal núcleo	51.36	0.62	0.45	24.76	0.99	16.85	4.77	0.06	99.86	54.81
OU-07	núcleo reliquiar	50.47	0.43	0.62	24.71	0.95	16.42	4.78	0.07	98.44	54.21
OU-07	fenocristal borda	50.06	0.63	1.20	15.49	0.61	13.08	17.01	0.18	98.26	60.07
OU-07	fenocristal núcleo	50.41	0.35	0.67	24.41	1.06	16.57	4.81	0.08	98.35	54.74
OU-14	fenocristal borda	51.06	0.69	1.26	15.22	0.60	13.30	17.53	0.24	99.89	60.89
OU-14	fenocristal núcleo	50.09	0.75	1.40	16.24	0.54	12.64	17.49	0.25	99.41	58.11
OU-32	fenocristal borda	50.34	0.68	1.14	15.50	0.58	12.89	17.28	0.21	98.62	59.72
OU-32	fenocristal núcleo	50.44	0.66	1.12	15.42	0.63	12.76	17.63	0.26	98.92	59.61
OU-32	microfenocristal núcleo	50.51	0.42	0.66	25.86	1.02	14.97	5.48	0.07	98.99	50.79
FTM-259	fenocristal núcleo	49.94	0.61	1.18	15.57	0.60	12.85	17.47	0.23	98.44	59.52

Valores dos óxidos em porcentagem.

Tabela 4. Análises químicas da matriz vítrea de amostras do Grupo 1 obtidas em microsonda eletrônica por EDS

Amostra	Foto	Localização	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
OU-02	17a	1	71.79	2.22	9.61	8.70	0.63	0.44	2.72	2.93	0.00	99.03
OU-02	17a	2	71.89	0.00	15.90	0.82	0.22	0.68	3.43	6.97	0.00	99.91
OU-02	17a	3	69.29	0.34	16.82	1.07	0.75	0.76	5.06	5.79	0.00	99.88
OU-02	17a	4	72.60	0.26	16.22	0.66	0.50	0.93	3.96	4.80	0.00	99.93
OU-02	17a	5	78.96	0.44	10.85	2.22	0.42	0.47	1.88	4.51	0.00	99.75
OU-02	17a	6	82.57	0.00	10.67	0.88	0.00	0.38	2.10	3.30	0.00	99.90
OU-02	17a	7	68.34	0.16	17.20	2.49	1.58	0.83	3.59	5.52	0.00	99.72
OU-02	17a	8	68.74	0.86	16.00	3.45	1.12	0.66	2.97	5.81	0.00	99.61
OU-02	17a	9	68.62	0.45	18.43	0.67	0.75	0.97	4.92	5.13	0.00	99.93
OU-02	17b	1	55.53	3.49	11.48	16.32	1.06	2.29	3.37	2.77	1.87	98.18
OU-02	17b	2	80.12	0.28	10.19	1.79	1.06	0.98	2.44	2.95	0.00	99.80
OU-02	17b	3	73.82	0.45	15.60	2.13	0.89	0.87	2.54	3.38	0.09	99.76
OU-02	17b	4	73.82	0.45	15.60	2.12	0.89	0.87	2.54	3.38	0.09	99.76
OU-02	17b	5	83.66	0.15	8.95	1.10	0.82	0.39	2.31	2.51	0.00	99.89
OU-02	17b	6	60.91	1.01	12.12	15.30	0.60	0.94	1.08	6.33	0.00	98.29
OU-02	17b	7	56.40	0.52	24.37	8.66	1.00	1.41	1.02	5.67	0.32	99.37
OU-02	17b	8	68.95	0.42	15.86	2.46	1.08	1.13	3.20	6.30	0.32	99.72
OU-02	17b	9	70.03	0.02	17.59	0.99	0.50	1.01	4.07	5.40	0.28	99.89
OU-02	17b	10	71.35	0.04	16.82	0.49	0.43	0.95	3.79	5.74	0.35	99.96
OU-14	18a		98.95	0.00	0.88	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	100.00
OU-14	18a		76.64	0.79	12.92	2.32	0.88	0.49	2.37	3.32	0.00	99.74
OU-14	18a	1	75.64	0.94	12.86	2.44	0.38	0.72	3.00	3.73	0.00	99.73
OU-14	18b	2	71.14	1.55	13.19	4.82	0.95	0.61	2.84	4.37	0.00	99.46
OU-14	18b	3	73.60	0.69	15.19	1.57	0.81	0.41	3.11	4.44	0.00	99.83
OU-14	18b	4	69.90	1.25	13.72	4.86	0.43	0.58	2.99	5.72	0.00	99.46
OU-14	18b	5	75.26	0.65	14.11	0.56	0.41	0.32	2.67	5.97	0.00	99.94
Média			71.84	0.45	14.65	2.12	0.75	0.74	2.90	4.66	0.00	98.11

Tabela 5. Análises químicas da matriz vítrea de amostras do Grupo 1 obtidas em microsonda eletrônica por WDS

Amostra	Ponto	Tipo de matriz	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg #
OU-02	P5	matriz escura	69.25	0.35	14.60	2.45	0.00	0.42	0.79	4.20	5.83	97.89	25.43
OU-02	P5A	matriz escura	70.06	0.29	14.60	2.63	0.00	0.29	0.80	4.18	5.98	98.84	19.00
OU-02	P6	matriz escura	71.11	0.23	14.78	0.75	0.04	0.34	0.48	3.68	6.98	98.40	27.58
OU-02	P5B	matriz clara	72.42	0.41	14.09	0.71	0.00	0.06	0.75	4.15	5.73	98.32	6.83
OU-02	P7	matriz muito escura	68.89	0.33	15.27	1.51	0.05	0.42	0.83	4.42	5.74	97.45	24.06
OU-02	P8	matriz clara	77.79	0.17	11.88	0.43	0.00	0.02	0.40	2.95	5.85	99.49	4.78
OU-02	P10	matriz clara	76.85	0.25	12.28	1.59	0.02	0.07	0.16	2.83	6.76	100.81	17.21
OU-02	P11	matriz muito clara	69.99	0.30	15.39	0.42	0.00	0.20	0.70	3.90	7.45	98.35	20.77
OU-02	P12	matriz clara	80.49	0.25	10.00	1.26	0.00	0.02	0.39	2.53	5.27	100.21	8.43
OU-02	P13	matriz muito escura	70.17	0.17	15.15	1.02	0.00	0.32	0.50	3.96	7.24	98.52	28.85
OU-02	P15	matriz muito clara	67.76	0.12	17.64	0.67	0.00	0.00	0.42	4.40	8.67	99.67	0.00
OU-02	P16	matriz turva	74.45	0.36	13.54	1.48	0.00	0.04	0.72	4.05	5.39	100.02	5.35
OU-02	P17	matriz clara	74.33	0.27	13.56	0.64	0.06	0.04	0.50	3.47	6.31	99.18	7.53
OU-02	P18	matriz clara	76.29	0.22	13.21	1.35	0.06	0.01	0.48	3.74	5.74	101.09	2.89
OU-02	P20	matriz escura	71.03	0.25	14.31	1.16	0.00	0.30	0.71	3.79	6.36	97.91	28.71
OU-02	P21	matriz muito clara	73.28	0.22	14.02	3.38	0.02	0.01	0.21	3.28	7.84	102.27	3.56
OU-02	P22	matriz muito clara	77.05	0.12	11.98	0.65	0.00	0.20	0.35	3.00	5.98	99.33	22.82
OU-02	P23	matriz clara	69.86	0.44	16.06	3.40	0.00	0.04	0.71	4.39	6.76	101.67	6.24
OU-02	P24	matriz turva	66.74	0.73	14.47	1.79	0.00	0.49	0.86	3.91	6.02	95.01	22.26
OU-02	P28	matriz turva	77.71	0.13	11.98	1.16	0.00	0.08	0.37	3.14	6.30	100.87	18.92
OU-02	P30	matriz escura	68.56	0.48	14.87	1.70	0.02	0.36	0.93	4.37	5.65	96.93	17.39
Média			72.58	0.29	13.98	1.44	0.01	0.18	0.57	3.73	6.37	99.15	15.17

Tabela 5. Análises químicas da matriz vítrea de amostras do Grupo 1 obtidas em microsonda eletrônica por WDS (continuação)

Amostra	Ponto	Tipo de matriz	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg #
OU-14	P1	matriz muito escura	71.14	0.80	12.82	3.33	0.06	0.03	0.60	3.73	5.54	98.05	1.47
OU-14	P1A	matriz muito escura	72.74	0.65	12.71	2.61	0.05	0.03	0.73	3.96	4.78	98.27	2.44
OU-14	P8	matriz escura	72.09	0.59	13.22	2.49	0.02	0.04	0.67	3.93	5.32	98.36	3.15
OU-14	P7	matriz clara	73.48	0.71	12.77	2.10	0.01	0.00	0.53	3.82	5.67	99.10	0.38
OU-14	P9A	matriz clara	73.63	0.43	12.86	0.88	0.03	0.01	0.38	3.51	6.21	97.94	2.19
OU-14	P9B	matriz clara	69.98	0.26	14.87	1.32	0.01	0.27	0.33	3.38	8.22	98.63	28.92
OU-14	P9C	matriz escura	76.67	0.29	11.06	1.89	0.04	0.11	0.48	2.95	4.74	98.22	10.17
OU-14	P11	matriz clara	72.20	0.43	14.05	2.29	0.02	0.20	0.31	2.97	7.25	99.72	14.99
OU-14	P12	matriz escura	71.43	0.31	14.38	1.35	0.00	0.25	0.75	3.75	6.35	98.56	26.63
OU-14	P14	matriz clara	74.96	0.39	13.28	1.12	0.00	0.02	0.49	3.71	5.87	99.84	3.26
OU-14	P15	matriz muito escura	75.38	0.33	11.26	3.35	0.04	0.10	0.77	3.57	4.13	98.93	5.48
OU-14	P17	matriz muito escura	72.26	0.77	12.93	2.87	0.05	0.04	0.73	4.15	4.70	98.50	2.69
OU-14	P18	matriz clara	76.43	0.52	12.21	1.12	0.00	0.03	0.40	3.64	5.07	99.42	4.38
OU-14	P19	matriz clara	72.74	1.14	12.48	3.45	0.06	0.04	0.55	3.57	5.26	99.28	2.02
OU-14	P22	matriz muito clara	72.64	0.62	13.19	2.46	0.11	0.04	0.65	3.99	4.89	98.59	2.97
OU-14	P25	matriz muito escura	73.00	0.62	12.48	2.28	0.15	0.02	4.08	4.84	5.39	102.86	1.71
OU-14	P28	matriz muito escura	73.24	0.56	13.00	1.97	0.05	0.02	0.65	4.08	4.84	98.41	1.68
OU-14	P29	matriz turva	73.12	0.44	13.05	1.73	0.05	0.01	0.35	3.56	6.35	98.66	0.68
Média			73.17	0.55	12.92	2.15	0.04	0.07	0.75	3.73	5.59	98.96	6.40
FTM-259	P1	matriz escura	72.40	0.58	12.72	2.47	0.00	0.24	0.64	3.40	5.20	97.65	14.84
FTM-259	P2	matriz muito escura	69.57	0.51	12.94	2.36	0.02	0.19	0.62	2.86	6.63	95.70	12.46
FTM-259	P3	matriz clara	74.31	0.46	13.06	1.41	0.04	0.02	0.78	4.25	4.50	98.82	2.80
FTM-259	P4	matriz muito clara	78.18	0.31	11.25	0.92	0.00	0.06	0.80	3.66	3.68	98.84	9.74
FTM-259	P5	matriz escura	66.00	0.24	17.34	0.97	0.01	0.04	1.27	5.30	5.97	97.15	7.11
FTM-259	P6	matriz escura	77.22	0.56	9.90	0.86	0.01	0.04	0.19	1.64	6.82	97.23	7.03
Média			72.95	0.44	12.87	1.50	0.01	0.10	0.72	3.52	5.47	97.57	9.00

Tabela 6. Análises químicas de rocha por ICP-OES das amostras estudadas. As colunas em azul, com amostras TM, representam as análises obtidas por Montanheiro (1999). As amostras FTM, correspondem às amostras TM, fornecidas por Montanheiro que foram reanalisadas para efeito de comparação.

Amostras	OU-01a	OU-02	OU-07	OU-09	OU-12	OU-14	OU-32	OU-33	OU-34	OU-36
SiO ₂	64.75	64.78	64.94	65.80	65.57	65.05	63.50	64.38	65.93	65.72
Al ₂ O ₃	13.03	12.83	12.95	13.24	12.94	12.86	12.84	12.63	12.53	12.72
Fe ₂ O ₃	6.63	6.65	6.73	6.83	6.62	6.62	6.68	6.74	6.48	6.90
MgO	1.17	1.21	1.06	0.67	1.17	1.24	0.72	0.86	0.76	1.03
CaO	2.53	2.26	2.62	1.65	2.41	2.19	1.90	2.61	1.53	2.12
Na ₂ O	3.45	3.39	3.43	3.29	3.27	3.28	3.46	3.40	2.99	3.21
K ₂ O	4.20	4.44	4.28	4.26	4.45	4.42	4.16	4.05	4.51	4.58
P ₂ O ₅	0.31	0.31	0.32	0.33	0.31	0.31	0.31	0.30	0.29	0.30
MnO	0.13	0.10	0.14	0.01	0.12	0.11	0.32	0.13	0.09	0.13
TiO ₂	1.19	1.22	1.22	1.22	1.18	1.18	1.20	1.19	1.16	1.17
P.F.	0.80	1.36	1.00	1.78	1.20	1.5	1.27	0.78	1.75	1.06
Total	98.19	98.55	98.69	99.09	99.24	98.75	96.36	97.07	98.04	98.93

Mg#	25.90	26.49	23.78	16.70	25.93	27.06	17.59	20.17	18.85	22.82
A/CNK	0.88	0.89	0.86	1.02	0.89	0.91	0.94	0.86	1.00	0.90

Ba	1104	1054	1124	1309	1114	1297	1550	1058	1104	1023
La	74	64	71	66	73	70	75	1190	53	58
Sr	341	327	333	334	325	339	328	325	310	294
V	37	45	43	49	55	40	25	21	25	24
Y	56	57	56	90	55	55	61	54	51	52
Zr	508	495	509	523	509	496	440	351	390	415

valores em porcentagem para os elementos maiores e em ppm para os elementos traço

Tabela 6. Análises químicas de rocha por ICP-OES das amostras estudadas. As colunas em azul, com amostras TM, representam as análises obtidas por Montanheiro (1999). As amostras FTM, correspondem às amostras TM, fornecidas por Montanheiro, que foram reanalisadas para efeito de comparação.

Amostra	FTM-225B	TM-287	FTM-225C	TM-284	FTM-258	TM-311	FTM-259A	TM-312
SiO ₂	64.52	66.53	64.98	70.80	68.17	69.13	63.67	64.47
Al ₂ O ₃	13.54	12.94	12.80	11.84	12.33	11.73	14.34	14.06
Fe ₂ O ₃	7.24	7.47	6.75	5.42	7.02	7.03	7.80	7.83
MgO	0.33	0.41	0.99	0.41	0.37	0.43	0.13	0.19
CaO	1.24	1.44	2.14	1.41	1.34	1.50	1.37	1.49
Na ₂ O	3.07	3.08	3.34	2.68	2.89	2.82	3.17	3.19
K ₂ O	4.57	3.81	4.74	4.68	4.44	3.69	5.38	4.82
P ₂ O ₅	0.32	0.45	0.33	0.30	0.27	0.17	0.34	0.37
MnO	0.17	0.18	0.13	0.06	0.13	0.15	0.17	0.18
TiO ₂	1.22	1.19	1.26	1.05	1.04	1.07	1.31	1.27
P.F.	2.00	1.87	1.28	1.17	1.55	1.72	1.59	1.54
Total	98.22	99.37	98.75	99.82	99.58	99.44	99.28	99.41

Mg#	8.28	9.80	22.51	13.03	9.45	10.80	3.24	4.59
A/CNK	1.11	1.10	0.88	0.98	1.03	1.03	1.06	1.07

Ba	2219	-	954	-	1136	-	1352	-
La	58	-	39	-	58	-	60	-
Sr	336	-	304	-	261	-	311	-
V	26	-	30	-	55	-	31	-
Y	369	-	55	-	169	-	63	-
Zr	438	-	454	-	374	-	497	-

valores em porcentagem para os elementos maiores e em ppm para os elementos traço

