



MARCELO CANALS MEUCCI

**ESTRATIGRAFIA E PADRÕES DE POROSIDADE DAS ROCHAS VULCÂNICAS
DA REGIÃO DA CACHOEIRA DA MULADA, CAXIAS DO SUL, RS**

Porto Alegre, 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GEOLOGIA
DEPARTAMENTO DE MINERALOGIA E PETROLOGIA

MARCELO CANALS MEUCCI

**ESTRATIGRAFIA E PADRÕES DE POROSIDADE DAS ROCHAS VULCÂNICAS
DA REGIÃO DA CACHOEIRA DA MULADA, CAXIAS DO SUL, RS**

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

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

Supervisora: Ms. Natália Gauer Pasqualon

Porto Alegre, 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Meucci, Marcelo Canals
Estratigrafia e padrões de porosidade das rochas
vulcânicas da região da Cachoeira da Mulada, Caxias do
Sul, RS / Marcelo Canals Meucci. -- 2022.
110 f.
Orientador: Evandro Fernandes de Lima.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2022.

1. Grupo Serra Geral. 2. litofácies vulcânicas. 3.
petrografia vulcânica. 4. reservatórios não
convencionais. I. Lima, Evandro Fernandes de, orient.
II. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "ESTRATIGRAFIA E PADRÕES DE POROSIDADE DAS ROCHAS VULCÂNICAS DA REGIÃO DA CACHOEIRA DA MULADA, CAXIAS DO SUL, RS" elaborado por "MARCELO CANALS MEUCCI", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

Prof. Dr. Vinicius Matté

Prof. Msc. Andrea Sander

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a toda a minha família, em especial ao meu irmão e meus pais por todo suporte e auxílio durante toda essa jornada. A lasmin por estar sempre do meu lado, me animando e apoiando.

Ao Dudu e Prisco pela parceria nos jogos e pelas boas risadas tarde da noite.

Aos meus queridos amigos que fiz durante a graduação, em especial a Jo e o Endrizzi.

Agradeço imensamente a Samantha por ter aberto as portas da Cachoeira da Mulada.

Ao Chinês, um grande amigo e orientador, que muito me ajudou e ensinou nesses anos de pesquisa e trabalho. Aos meus amigos da bolsa Nati, Brose, Ingrid, Vini e Carol, pelas ótimas discussões, ajuda em campo e pelos bons momentos de descontração. A Nati pela parceria e disposição para ajudar sempre, mesmo em outro fuso horário.

Ao Matheuzinho e seu pai Roberto pela ajuda de última hora.

Aos professores e professoras da geologia, principalmente a Amanda, Renata e Frank, pelo auxílio na realização deste trabalho.

Agradeço também o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP.

*“If you can find a path with no obstacles,
it probably doesn’t lead anywhere.”*

– Bear Grylls

RESUMO

Nos últimos anos, o estudo dos aspectos petrofísicos de sistemas vulcânicos tem se intensificado, especialmente pela possibilidade destes litotipos apresentarem características permo-porosas compatíveis com rochas reservatórios ou selos para hidrocarbonetos. O principal objetivo deste trabalho é identificar e associar as litofácies, realizar a descrição petrográfica, e relacionar os padrões de porosidade com o arcabouço estratigráfico dos depósitos vulcânicos do Gr. Serra Geral na região da Cachoeira da Mulada. A área de estudo está localizada no distrito de Criúva (município de Caxias do Sul, RS), e está inserida na Província Ígnea Paraná-Etendeka, uma sucessão vulcânica de basaltos e andesitos basálticos com riolitos e dacitos subordinados. Para a construção do arcabouço estratigráfico foram levantadas 3 seções colunares em 2 perfis, totalizando 48 pontos, onde foram descritas e identificadas as litofácies e coletadas amostras. Para análise petrográfica, foram selecionadas 13 amostras, com o objetivo de classificar a litologia, descrever texturas/estruturas e caracterizar os padrões de porosidade. Foram identificadas 3 litofácies de composição básica: basaltos brechados (Bbr), com blocos vesiculados (Bbv) e maciços (Bm). Elas são interpretadas como derrames do tipo *rubbly pahoehoe*, correlacionadas a Fm. Vale do Sol. Para a composição ácida, correlacionada com a Fm. Palmas, foram identificadas 3 litofácies associadas com sistemas de alimentação de derrames laminares: dacitos afaníticos subverticais (Das), com blocos vesiculados (Dbv) e sub-horizontais (Dah). Também se identificou 3 litofácies ácidas associadas a derrames tabulares dacíticos com terminações lobadas: dacitos porfíricos maciços (Dpm), vitrofíricos (Dvtp) e vesiculados (Dv). Identificou-se ainda uma litofácies classificada previamente como um dacito vitrofírico vesiculado (Dvtv). As litofácies básicas, petrograficamente apresentam textura afanítica a muito fina composta por vidro alterado e micrólitos de plagioclásio e piroxênio; já para as litofácies ácidas, estas apresentam uma textura glomeroporfírica a porfírica (fenocristais de plagioclásio e piroxênio) imersos em uma matriz afanítica a muito fina, com porções desvitrificadas e localmente vitrofírica porfírica (Dvtp). As estruturas de fluxo são marcadas por bandas com diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação. As vulcânicas básicas apresentam valores maiores de porosidade chegando a 4 a 5% para as litofácies Bm e Bbr, e 0,5% para a Bbv, representadas pelos tipos vesicular, intra-cristal e *drusy*. Para as vulcânicas ácidas os valores de porosidade são muito baixos variando entre 0 a 0,6% para a litofácies Das, e valores mais baixos para as outras entre 0% e 0,2%, representadas pelos tipos intra-cristal e *drusy*. Apesar disso, algumas litofácies são ricas em amígdalas (Bbr, Bbv, Dbv), evidenciando um alto grau de vesiculação, porém intensamente afetado pela precipitação de minerais secundários. Os resultados obtidos neste trabalho auxiliam no detalhamento litoestratigráfico do Gr. Serra Geral, além de servirem de base para geração de modelos análogos para reservatórios não-convencionais vulcânicos, como em bacias vulcanossedimentares *offshore*, onde a aquisição de dados é complexa.

Palavras-Chave: litofácies vulcânicas, reservatórios não-convencionais, petrografia vulcânica, Grupo Serra geral.

ABSTRACT

In the last years, the study of the petrophysical aspects of volcanic systems has grown, especially due to the possibility of such lithotypes to present permo-porous characteristics which are compatible with reservoir rocks or hydrocarbon seals. This work aims at identifying and associating the lithofacies, realizing the petrographical description, and relating the porosity patterns with the stratigraphic framework of the volcanic deposits of the *Serra Geral* Group in the region of the *Cachoeira da Mulada* (Mulada Waterfall) The studied area is located in the district of *Criúva*, in the municipality of *Caxias do Sul, Rio Grande do Sul*. It is found in the Parana-Etendeka Igneous Province, a volcanic succession of basalts and basaltic andesites with subordinate rhyolites and dacites. In order to build the stratigraphic framework, 3 columnar sections were raised in 2 profiles, adding up to a total of 48 points, where the lithofacies were described and identified, and samples were collected. For the petrographical analysis, 13 samples were selected, aiming at classifying the lithology, describing textures/structures, and characterizing the porosity patterns. 3 lithofacies of basic composition were identified: basalt with a rubbly top (Bbr), with vesicular blocks (Bbv) and massive rock (Bm). They are interpreted as *rubbly pahoehoe* type flows, correlated to the *Vale do Sol* Formation. For the acidic composition, correlated with the *Palmas* Formation, 3 lithofacies were associated with feeding systems of laminar flow: subvertical aphanitic dacites (Das), with vesicular blocks (Dbv) and sub-horizontal (Dah). Also 3 acidic lithofacies were identified and associated with tabular dacitic lava with lobate terminations: massive porphyritic dacites (Dpm), porphyritic vitrophyric dacites (Dvtp) and vesicular dacites (Dv). Also it was identified and classified beforehand a lithofacies as a vitrophyric vesicular dacite (Dv tv). The basic lithofacies petrographically present a fine aphanitic texture, composed by altered glass, pyroxene and plagioclase; the acidic lithofacies, on the other hand, present a texture that ranges from glomeroporphyritic to porphyritic (plagioclase and pyroxene phenocrystals) surrounded by a very thin aphanitic matrix, with devitrified portions and locally vitrophyric and porphyritic (Dvtp) The flow structures are marked by bands with different crystallinities (devitrification) and oxidation. The basic volcanic rocks present higher porosity values, reaching 4 to 5% in the Bm and Bbr lithofacies, and 0,5% for Bbv, represented by the vesicular, intra-crystal and *drusy* types. In the acidic volcanic rocks, and porosity values are much lower, ranging from 0 to 0,6% in the Das lithofacies, and even lower in the others, ranging from 0 to 0,2%, represented by the intra-crystal and *drusy* types. In spite of that, some lithofacies are rich in amygdalas (Bbr, Bbv, Dbv), evidencing a high degree of vesiculation, although intensely affected by the precipitation of secondary minerals. The results achieved in this work aid in the lithostratigraphic detailing of the *Serra Geral* Group, and serve as a foundation for the production of analogous models for non-conventional volcanic reservoirs, such as in offshore volcano-sedimentary basins, where the data acquisition is complex.

Keywords: volcanic lithofacies, non-conventional reservoirs, volcanic petrography, *Serra Geral* Group.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo, dos perfis e do ponto PM01 (Fonte: autor - mapa baseado no Google Maps).	18
Figura 2 - Classificação de LIPs (traduzido de Bryan & Ernst, 2008).....	20
Figura 3 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas (arcos e sinclinal) (modificado de Rossetti et al., 2018)	21
Figura 4 - A) Mapa da distribuição das formações. B) Distribuição estratigráfica do GSG (traduzido e modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018)	23
Figura 5 - Coluna estratigráfica esquemática das formações do GSG (traduzido de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).	23
Figura 6 - Classificação de derrames básicos com base na morfologia (extraído de Barreto, 2016, traduzido de Duraiswami et al., 2014)	28
Figura 7 - Planilha utilizada para o levantamento estratigráfico em campo.	34
Figura 8 - Modelo utilizado para as litofácies (modificado de Mcphie <i>et al.</i> , 1993)....	35
Figura 9 – A) Localização dos perfis e do ponto PM01 (mapa baseado no Google Maps). B) Perfil Cachoeira da Mulada (Google Earth Pro). C) Perfil Criúva – Ponte dos Korff – São Manuel (Google Earth Pro) (Fonte: autor).	37
Figura 10 – Seção colunar Cachoeira da Mulada, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).....	41
Figura 11 - Seção colunar Criúva – Ponte dos Korff, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).....	42
Figura 12 - Seção colunar São Manuel – Ponte dos Korff, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).	43
Figura 13 - Perfil esquemático Criúva – São Manuel – Ponte dos Korff, com os pontos e as litofácies identificadas (Fonte: autor).	44
Figura 14 - Litofácies básicas identificadas. A) Basalto brechado (Bbr). B) Basalto com blocos vesiculados (Bbv). C) Basalto maciço (Bm) (Fonte: autor).....	47
Figura 15 - Litofácies ácidas identificadas. A) Dacito afanítico subvertical (Das) – Imagem em planta. B) Dacito com blocos vesiculados (Dbv). C) Dacito afanítico subhorizontal – Imagem em perfil. D) Dacito porfírico maciço (Dpm). E) Dacito vitrofírico porfírico (Dvtp) (Fonte: autor).....	48
Figura 16 – Detalhe da litofácies Dvtv, textura vitrofírica com alteração de cor verde. (Fonte: autor).....	49

Figura 17 – A) Fotografia de um derrame básico do tipo <i>rubbly pahoehoe</i> , no ponto PM09 na Cachoeira da Mulada. B) Croqui esquemático do derrame. (Fonte: autor)	52
Figura 18 – Gruta formada por erosão diferencial, feição típica do contato da Fm. Vale do Sol com a Fm. Palmas. (Fonte: autor)	52
Figura 19 – Associação de litofácies dos sistemas de alimentação de derrames ácidos no ponto PM01 (condutos e derrames laminares). A) Detalhe das bandas cinzas e vermelhas. B) Estrutura de fluxo subvertical. C) Estruturas dobradas e sub-horizontais. D e E) Detalhe de dobras internas a foliação. F) Detalhe da litofácies com blocos vesiculados (Dbv), localmente com textura <i>jigsaw-fit</i> . (Fonte: autor)	53
Figura 20 - Modelo de <i>emplacement</i> para os condutos e derrames laminares ácidos, baseado no modelo de Fink (1983) (Retirado de Lima <i>et al.</i> , 2018 – elaborado nas pedreiras da região de São Marcos).	54
Figura 21 – A) Lobos ácidos identificados no ponto PM34. B) Detalhe das vesículas estiradas na borda do lobo. C) Detalhe da capa vitrofírica oxidada. (Fonte: autor)	54
Figura 22 – A e B) Diques de diabásio, com textura afanítica e disjunções colunares. Estes são intrusivos nas litofácies Bm e Bbv de derrames tipo <i>rubbly pahoehoe</i> . (Fonte: autor)	55
Figura 23 - Correlação das associações de litofácies identificados com os perfis realizados. (Fonte: autor)	56
Figura 24 – Fotomicrografia das litofácies básicas. A e B) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bbr da textura afanítica e amigdalóide, com micrólitos de plagioclásio e piroxênio. C e D) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bbv da textura afanítica e amigdalóide, com cristais de plagioclásio, piroxênio e opacos. E e F) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bm da textura afanítica (mais grossa se comparado com as outras litofácies) e amigdalóide (menos presente), cristais de plagioclásio, piroxênio e opacos. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)	58
Figura 25 – Fotomicrografia das litofácies ácidas. A e B) Textura glomeroporfírica com fenocristais de plagioclásio e piroxênio. C) Detalhe da desvitrificação da matriz vítrea afanítica. D) Detalhe da matriz muito fina com cristais de plagioclásio e piroxênio. E) Textura afanítica com porções (mais claras) desvitrificadas. F) Textura vitrofírica com micrólitos de plagioclásio e piroxênio. G e H) Detalhe da foliação de fluxo nas litofácies Das e Dah, marcada por bandas desvitrificadas e oxidadas. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)	59

Figura 26 - Fotomicrografia da mineralogia e texturas identificadas nas litofácies ácidas. A e B) Cristal de ortopiroxênio (enstatita?). C) Cristal de clinopiroxênio (augita?/pigeonita?). D) Textura de borda de reação em piroxênio. E e F) Feições de reabsorção em plagioclásio (textura em peneira). Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).....	60
Figura 27 - Fotomicrografia da porosidade nas litofácies básicas. A) Porosidade primária do tipo vesicular (seta vermelha) (Bbr). B) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais secundários) (Bbr). C e D) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais secundários em amígdalas) (Bbv). E) Porosidade secundária do tipo <i>drusy</i> (em amígdala – setas vermelhas) (Bm). F) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais primários) (Bm). Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).(Fonte: autor).....	63
Figura 28 - Fotomicrografia da porosidade nas litofácies ácidas. A e B) Amígdalas e porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais primários – setas vermelhas). (Dbv). C e D) Amígdalas esféricas e ovais na litofácies Das e Dah. E) Porosidade secundária do tipo <i>drusy</i> (em amígdala – seta vermelha) (Dpm). F) Amígdala esférica e oval na litofácies Dvtp, preenchida por celadonita (?), zeólita e calcedônia. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Bbr – Basalto brechado
- Bbv – basalto com blocos vesiculados
- Bm – Basalto maciço
- CKM – Criúva - Ponte dos Korff - São Manuel
- CM – Cachoeira da Mulada
- Dah – Dacito afanítico subvertical
- Das – Dacito afanítico sub-horizontal
- Dbv – Dacito com blocos vesiculados
- Dpm – Dacito porfirítico maciço
- Dv – Dacito vesiculado
- Dvtp – Dacito vitrofírico porfirítico
- Dvtv – Dacito vitrofírico vesiculado
- FE – Formação Esmeralda
- FP – Formação Palmas
- FT – Formação Torres
- FVS – Formação Vale do Sol
- Fm – Formação
- Gr – Grupo
- GSG – Grupo Serra Geral
- LIP – Large Igneous Province
- PIPE – Província Ígnea Paraná-Etendeka

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Caracterização do problema	15
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Premissas e Hipótese	16
1.4 Objetivos	17
1.5 Localização da área de estudo.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Grandes Províncias Ígneas	19
2.2 Província Ígnea Paraná-Etendeka	20
2.3 Grupo Serra Geral	21
2.4 Estratigrafia vulcânica	25
2.4.1 <i>Morfologias de derrames básicos/intermediários e ácidos</i>	26
2.5 Padrões de porosidade em rochas vulcânicas.....	29
2.6 Sistemas vulcânicos em bacias petrolíferas	31
3 MÉTODOS	32
3.1 Pré-campo.....	32
3.1.1 <i>Revisão bibliográfica</i>	32
3.1.2 <i>Sensoriamento remoto</i>	33
3.2 Campo	33
3.2.1 <i>Levantamento estratigráfico</i>	33
3.2.2 <i>Registro fotográfico e amostragem</i>	35
3.3 Pós-campo	35
3.3.1 <i>Preparação de amostras</i>	35
3.3.2 <i>Tratamento dos dados de campo</i>	36
3.3.3 <i>Petrografia</i>	36
3.3.4 <i>Integração dos dados</i>	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Estratigrafia	38
4.1.1 <i>Litofácies</i>	38
4.1.2 <i>Associação de litofácies</i>	49
4.2 Petrografia	57
4.2.1 <i>Vulcânicas básicas</i>	57
4.2.2 <i>Vulcânicas ácidas</i>	57
4.3 Padrões de Porosidade.....	61
4.3.1 <i>Derrames básicos tipo rubbly pahoehoe</i>	61
4.3.2 <i>Sistemas de alimentação de derrames ácidos</i>	61
4.3.3 <i>Derrames tabulares dacíticos</i>	62
4.3.4 <i>Integração dos dados</i>	65
5 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	69

APÊNDICES	78
Apêndice A	78
Apêndice B	79

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a caracterização do problema, a justificativa do projeto, as premissas e hipótese, objetivos e a localização da área de estudo.

1.1 Caracterização do problema

A construção de um arcabouço estratigráfico em sistemas vulcânicos é uma ferramenta importante para o mapeamento geológico e para o entendimento da colocação e dinâmica eruptiva de lavas, rochas piroclásticas e de intrusivas rasas associadas. A estratigrafia de sistemas vulcânicos ainda é um campo de estudo em desenvolvimento, e tem ganhado cada vez mais importância, especialmente pela ocorrência destes litotipos em bacias vulcanossedimentares como reservatórios não-convencionais ou selos.

Devido à elevada heterogeneidade dos produtos vulcânicos, há uma dificuldade na compreensão de seu sistema permo-poroso. Para que as propriedades petrofísicas destas rochas sejam devidamente caracterizadas, é necessário estabelecer uma estruturação estratigráfica, com uma análise detalhada das diferentes litofácies e a associação destas (Couves *et al.*, 2016; Pasqualon, 2017; Rossetti *et al.*, 2019).

Neste sentido, este trabalho pretende caracterizar, quantificar e relacionar os padrões de porosidade para as diferentes litofácies dos depósitos vulcânicos do Grupo Serra Geral na região da Cachoeira da Mulada, distrito de Criúva, município de Caxias do Sul (RS). O Grupo (Gr) Serra Geral é uma nova proposta litoestratigráfica para a sucessão vulcanossedimentar da porção Sul da Província Ígnea Paraná-Etendeka no Brasil, previamente denominada de Formação (Fm) Serra Geral. Esta sucessão tem idade Cretácea e foi subdividida em 4 formações (Rossetti *et al.*, 2018): Fm. Torres, Fm. Vale do Sol, Fm. Palmas e Fm. Esmeralda. A área de estudo possui uma altitude de aproximadamente 900 m, e chegando a de 300 m, no vale do Rio das Antas. Na Cachoeira da Mulada, a queda d'água apresenta um desnível aproximado de 120m, o que proporciona ótimas exposições das Fm. Vale do Sol e Palmas. Os resultados obtidos poderão servir como base

para a geração de modelos análogos para reservatórios não-convencionais em bacias vulcanossedimentares *offshore*.

1.2 Justificativa

No Grupo Serra Geral, o sistema permo-poroso das litofácies básicas já foi caracterizado (e.g. Barreto *et al.*, 2017; Rossetti *et al.*, 2019; Becker *et al.*, 2019). No entanto, para a Fm. Palmas, constituída predominantemente de vulcanitos ácidos, os dados ainda são escassos. Além disso, na região da Cachoeira da Mulada o levantamento litofaciológico detalhado e das características petrofísicas das litofácies não havia sido realizado ainda.

O estudo estratigráfico de detalhe aliado à caracterização dos padrões de porosidade permite relacionar estes padrões com as diferentes litofácies na sucessão vulcânica, auxiliando na geração de modelos análogos para reservatórios não-convencionais. Adicionalmente, a área de estudo está inserida no contexto do Sistema Aquífero Serra Geral, e o estudo da porosidade e sua relação com as litofácies pode auxiliar no entendimento do fluxo e armazenamento de água subterrânea na região.

Além do viés industrial, este estudo permitirá uma melhor compreensão dos processos de *emplacement* dos produtos vulcânicos na área, possibilitando sua correlação com outras áreas já mapeadas. A caracterização do sistema permo-poroso das diferentes litofácies traz informações sobre o *degassing* das unidades e pode ser útil na discussão efusivas vs. explosivas na Fm. Palmas.

1.3 Premissas e Hipótese

Tem-se como hipótese que os padrões de porosidade nas rochas vulcânicas básicas e ácidas do Grupo Serra Geral na Cachoeira da Mulada são heterogêneos, variando de acordo com a faciologia, sendo as fácies vesiculares, autobrechadas e fraturadas com valores mais altos de porosidade, enquanto que as fácies maciças devem apresentar valores inferiores. Esta hipótese foi formulada a partir das seguintes premissas:

- A estratigrafia vulcânica do Grupo Serra Geral foi dividida em quatro formações, com base nas características litológicas, arquitetura de fácies, morfologias de fluxo, intra-fácies e composição geoquímica (Rossetti *et al.*, 2018). Diferenças nestas características geram padrões de porosidade distintos, mesmo dentro de uma mesma formação ou derrame.
- Porosidade vulcânica pode ser dividida em (1) primária: formada durante a ascensão do magma e *emplacement* na superfície, como vesículas, poros decorrentes das autobrechas e fraturas de resfriamento; ou (2) secundária: formada após o *emplacement*, como alteração e fraturas tectônicas (Rossetti *et al.*, 2019).
- A precipitação de minerais secundários deve obstruir parcialmente ou completamente os espaços da rocha, reduzindo drasticamente a porosidade e permeabilidade (Sruoga *et al.*, 2004), porém a microporosidade da rocha pode aumentar. Além disso, a capacidade de circulação de fluidos sugere uma permeabilidade na rocha, apesar de normalmente ser baixa (Couves *et al.*, 2016).

1.4 Objetivos

O objetivo do trabalho é caracterizar a litoestratigrafia das rochas aflorantes na região da Cachoeira da Mulada e os seus padrões de porosidade ao longo das diferentes litofácies na sucessão vulcânica. Deste modo, definiu-se as seguintes objetivos específicos:

- Descrever, associar e interpretar as litofácies existentes na região da Cachoeira da Mulada para a construção da litoestratigrafia;
- Caracterizar, quantificar e avaliar os padrões de porosidade das diferentes litofácies;
- Gerar um modelo integrado que relacione os padrões de porosidade identificados dentro das diferentes porções do arcabouço estratigráfico.

1.5 Localização da área de estudo

A área de estudo fica localizada no distrito de Criúva (município de Caxias do Sul) e parcialmente dentro do município de Campestre da Serra (Figura 1), na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Para chegar a Criúva e na Cachoeira da Mulada, saindo de Caxias do Sul pela Rota do Sol (BR-453) entrar a esquerda em Vila Seca, passando a localidade de Dalagno, vire à direita; é possível também chegar por São Marcos, seguindo a VRS - 315. Foram realizados 2 perfis ao longos das estradas e trilhas na região do distrito de Criúva: (1) Cachoeira da Mulada (Reserva Bertussi), (2) Criúva – Ponte dos Korff – São Manoel.

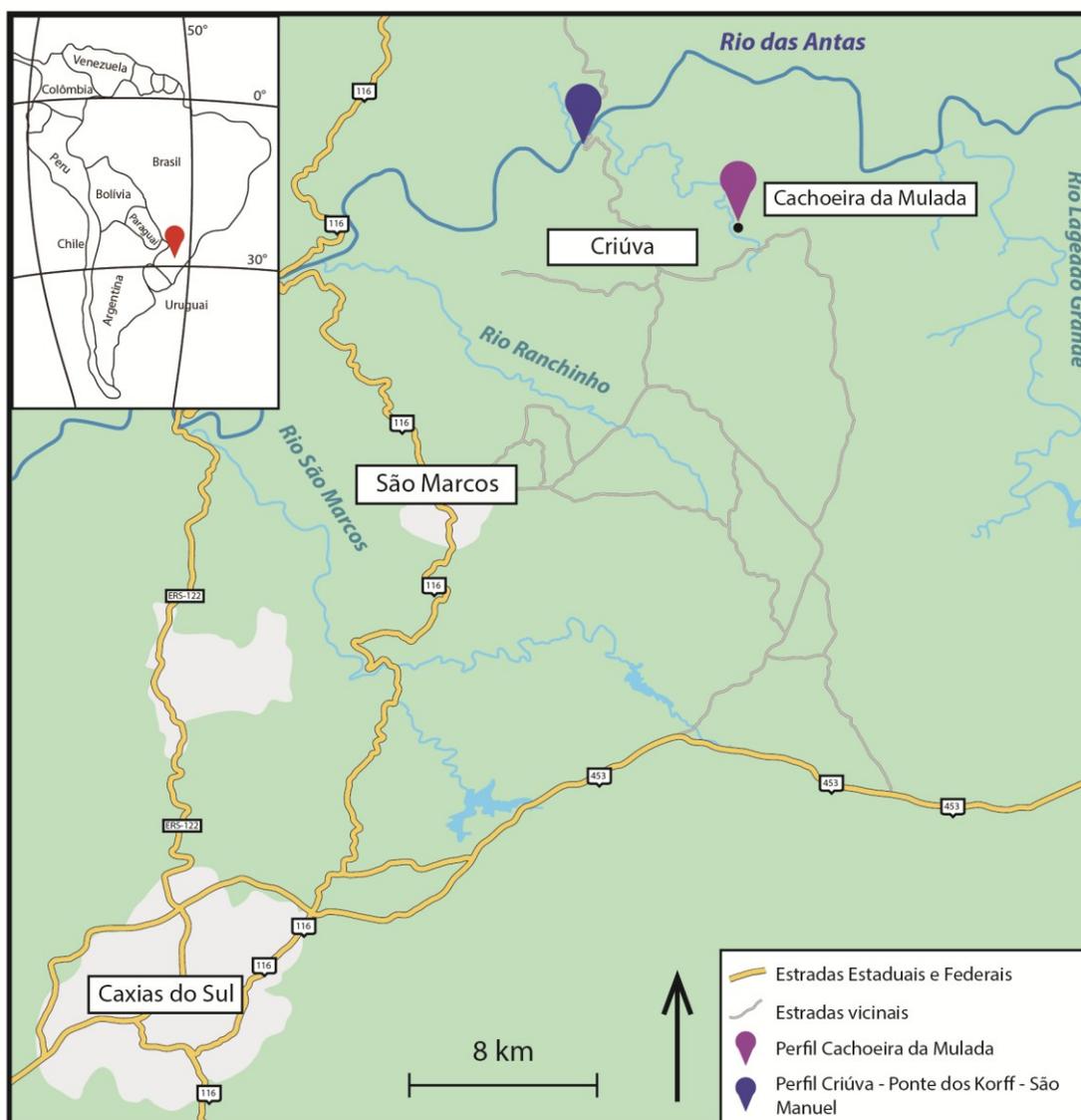


Figura 1 - Localização da área de estudo, dos perfis e do ponto PM01 (Fonte: autor - mapa baseado no Google Maps).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Grandes Províncias Ígneas

Os estudos para a categorização e terminologia das Grandes Províncias Ígneas, ou também conhecidas como *Large Igneous Province* (LIP), começaram na década de 90, com os trabalhos de Coffin & Eldholm (1992, 1994), onde definiram essas províncias como grandes acumulações ($>0,1 \text{ Mkm}^2$) de rochas ígneas extrusivas e intrusivas predominantemente máficas. A origem das LIPs está relacionada a processos diferentes dos processos de expansão do assoalho oceânico.

Bryan & Ernst (2008) revisaram a definição de LIP na qual enfatizaram quatro atributos além dos presentes na definição de Coffin & Eldholm (1994): grande volume, curta duração ou pulsos e configuração intraplaca ou geoquímica. Além disso, apesar de essas províncias serem predominantemente máficas, ocorrem termos ultramáficos subordinados e rochas ácidas em menor volume, assim como existem algumas LIPs continentais silicosas. As LIPs podem ser divididas com base na sua composição (ácida ou básica), em seu ambiente de colocação (oceânico ou continental), pela sua idade e tipo rocha (vulcânicas ou intrusivas) (Figura 2). Com base em Bryan & Ernst (2008), as Grandes Províncias Ígneas possuem extensões de área maiores que $0,1 \text{ Mkm}^2$ e volumes maiores de $0,1 \text{ Mkm}^3$, com um tempo de colocação de $\sim 50 \text{ Ma}$, sendo caracterizada por pulsos magmáticos de curta duração ($\sim 1-5 \text{ Ma}$), na qual uma grande proporção (75%) do volume total ígneo é colocado.

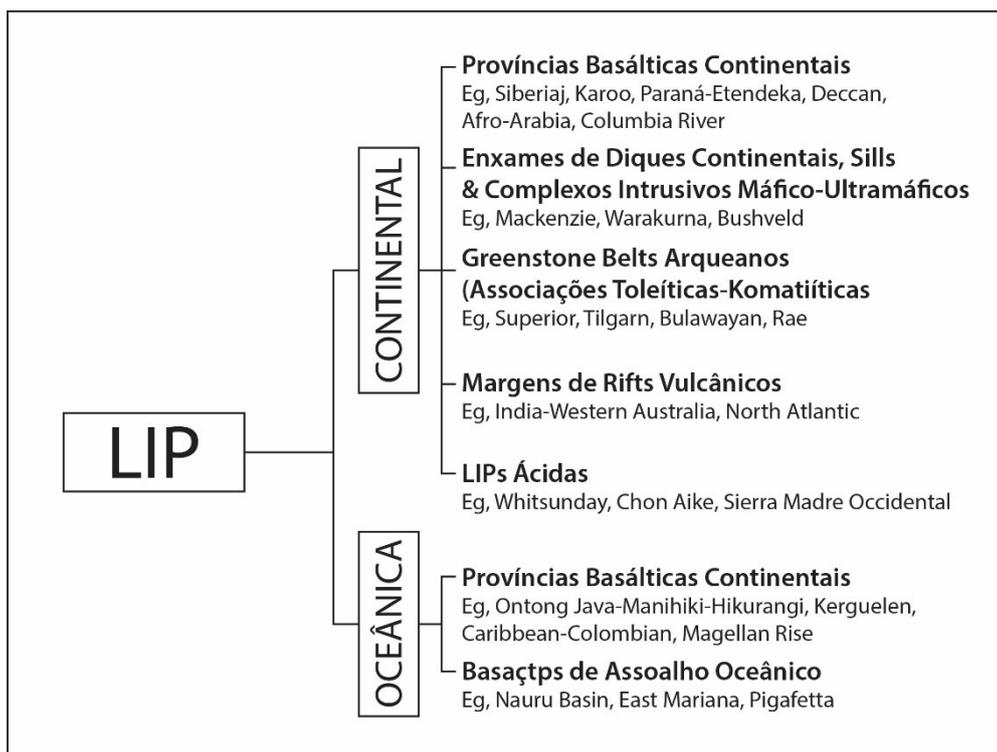


Figura 2 - Classificação de LIPs (traduzido de Bryan & Ernst, 2008)

2.2 Província Ígnea Paraná-Etendeka

A Província Ígnea Parana-Etendeka (PIPE) é uma LIP continental, também caracterizada como uma Província Basáltica Continental de idade do Cretáceo Inferior que precede a ruptura do supercontinente Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico. A maior parte deste magmatismo está na América do Sul (90%) cobrindo os países do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; enquanto o restante (10%) está localizado no sudoeste da África na Namíbia e Angola (Piccirillo & Melfi, 1988 *apud* Rossetti *et al.*, 2019; Peate, 1997). Na América do Sul, a província ocupa uma área de 917.000 km² e 600.000 km³, considerando vulcânicas e intrusivas (Frank *et al.*, 2009), possui uma espessura média de 700 m e pode chegar até 1750 m de profundidade na porção central da Bacia do Paraná (Piccirillo & Melfi, 1988 *apud* Rossetti *et al.*, 2019). As rochas vulcânicas possuem idades de 135 a 131 Ma, e o pico do magmatismo durou aproximadamente 1 Ma (Renne *et al.*, 1992; Jerram & Widdowson, 2005; Thiede & Vasconcelos, 2010; Janasi *et al.*, 2011; Dodd *et al.*, 2015; Baksi, 2017).

Dentro do contexto cronoestratigráfico da Bacia do Paraná, onde a PIPE está inserida no Brasil, ela representa o topo da sequência Gondwana III, uma supersequência vulcanossedimentar de idade Jurássica-Eocretácica, composta pelos sedimentos eólicos da Fm. Botucatu e as vulcânicas e intrusivas do Gr. Serra Geral (Milani *et al.*, 2007) (Figura 3).

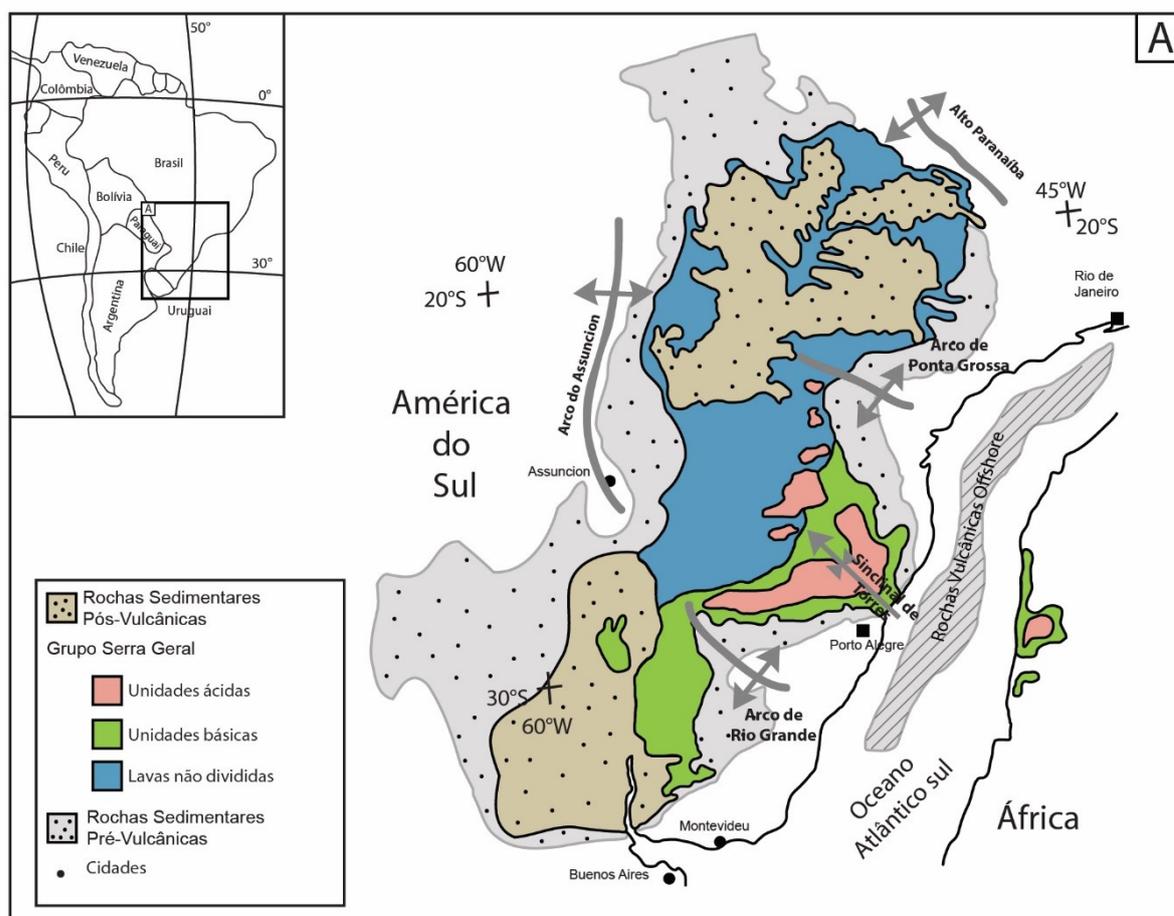


Figura 3 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas (arcos e sinclinal) (modificado de Rossetti *et al.*, 2018)

2.3 Grupo Serra Geral

As rochas vulcânicas da PIPE são compostas predominantemente por basaltos e andesitos basálticos de afinidade toleítica, e subordinadamente por riolitos e dacitos. Essas rochas foram inicialmente denominadas de Fm. Serra Geral, e subdivididas em 2 grupos com base nos conteúdos de TiO_2 das rochas básicas: alto Ti (>2 %) e baixo Ti (<2 %) (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985).

Posteriormente, estes grupos foram subdivididos em magmas tipo, fundamentados em parâmetros geoquímicos para diferenciar os tipos de magmas (Peate *et al.*, 1992). Para as rochas ácidas, Mantovani *et al.* (1985) descreveram dois grupos, baseados nos teores de elementos-traço incompatíveis: Grupo Chapecó (alto teor) e Grupo Palmas (baixo teor).

Recentemente, Rossetti *et al.* (2018) propuseram uma nova litoestratigrafia para a porção sul da PIPE, na calha de Torres, subdividindo a Formação Serra Geral em formações, tornando-a Grupo Serra Geral (GSG) (Figura 4). A pilha vulcânica foi dividida em quatro formações: Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda (Figura 5). Para a construção de uma proposta estratigráfica formal, foram utilizados como base os dados de arquitetura de fácies, aspectos morfológicos das lavas e características petrográficas (Quadro 1). Na base, a Fm. Torres (FT) é caracterizada por basaltos do tipo *pahoehoe* simples e compostos que sobrepõem os arenitos eólicos da Fm. Botucatu. A Fm. Vale do Sol (FVS) é composta por derrames espessos (>20m) de basaltos e andesitos basálticos do tipo *rubbly pahoehoe*, sucedidos pela Fm. Palmas (FP), que é constituída por domos de lavas, derrames tabulares e sistemas complexos de alimentação dacíticos a riolíticos. No topo, a Fm. Esmeralda (FE) é formada por basaltos do tipo *pahoehoe* simples e compostos, semelhantes aos observados na Fm. Torres (Waichel *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2018).

As formações do GSG podem ser associadas a diferentes estágios da atividade vulcânica (Cruz, 2019): (1) a FT marca o início com a colocação de lavas basálticas com baixas taxas de efusão; (2) a FVS representa o climax vulcânico, marcado pelos derrames espessos do tipo *rubbly pahoehoe*; (3) a FP marca uma mudança composicional para lavas mais silicosas que se interdigitam com a FVS; (4) a FE marca o declínio do vulcanismo, composta por lavas basálticas do tipo *pahoehoe*, similar a FT.

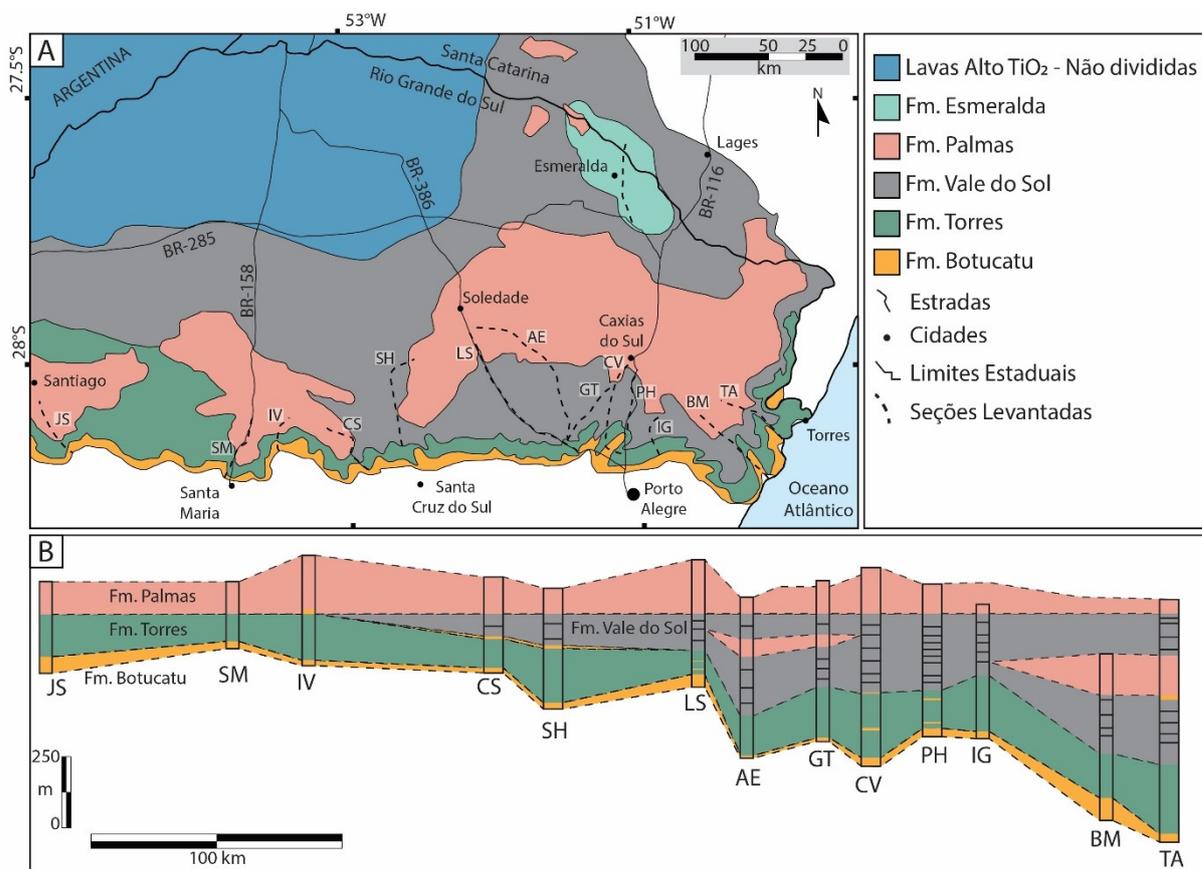


Figura 4 - A) Mapa da distribuição das formações. B) Distribuição estratigráfica do GSG (traduzido e modificado de Rossetti *et al.*, 2018)

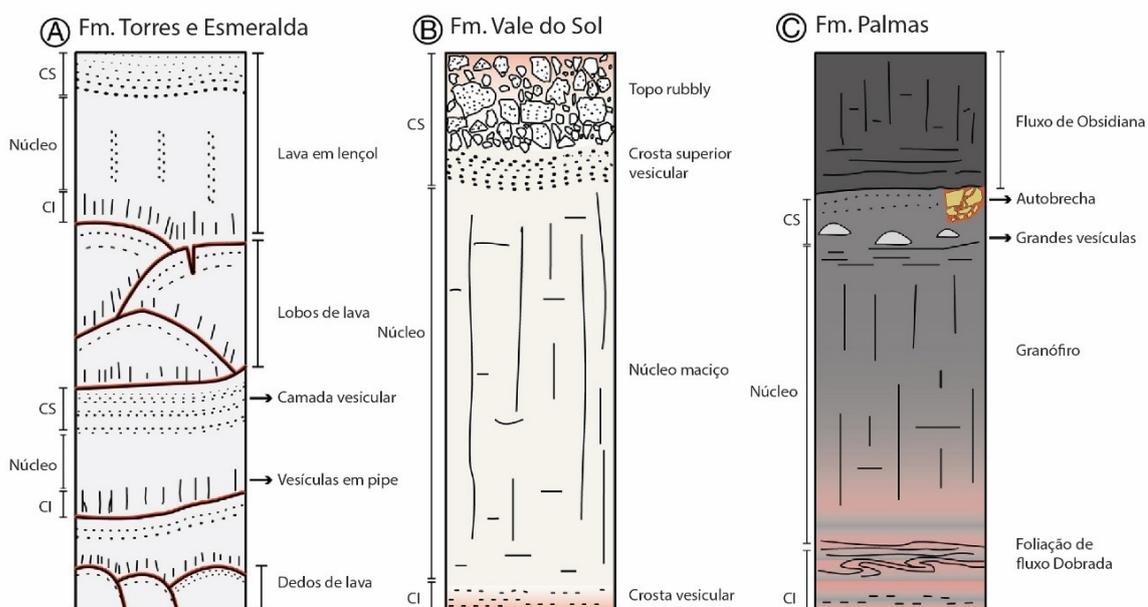


Figura 5 - Coluna estratigráfica esquemática das formações do GSG (traduzido de Rossetti *et al.*, 2018).

Quadro 1 - Características físicas, arquitetura de fácies e petrografia das formações do GSG (traduzido de Rossetti *et al.*, 2018).

Formação	Espessura da unidade/Espessura do derrame	Fácies da lava	Características físicas principais	Características petrográficas
Esmeralda	25-300 m 0,2-3 m	Composta anastomosada	Lobos de lava métrico com estrutura típica <i>pahoehoe</i> : crosta basal vesicular, núcleo maciço e crosta superior vesicular.	Afírico a afanítico basaltos escuros. Micrólitos de plagioclásio aciculares a esquelético, augita e óxidos de Fe. Matriz vítrea.
Palmas	40-400 m ?	Tabular clássica	Extensos derrames tabulares de dacitos, riolitos e obsidiana. Terminações lobadas, foliações de fluxo, porções de autobrechas, camadas de vesículas e megavesículas.	Textura vitrofírica, fenocristais de plagioclásio e augita, comumente textura granofírica com intercrescimento de K-feldspato e quartzo.
Vale do Sol	40-500 m 20-60 m	Tabular clássica	Geometria simples tabular de lavas <i>rubbly pahoehoe</i> . Estruturadas em 4 partes: crosta basal vesicular; núcleo maciço; crosta coerente vesicular; superfície <i>rubbly</i> .	Andesitos basálticos afanítico a fanerítico fino, raramente plagioclásio porfírico. Plagioclásio fino com augita e óxidos de Fe intergranular.
Torres	100,290 m 0,2-18 m	Composta anastomosadas	Lobos e dedos de lava, e lobos em lençol. Estrutura típica de <i>pahoehoe</i> com: crosta basal com vesículas do tipo <i>pipe</i> , núcleo maciço, e crosta superior vesicular.	Basalto fanerítico médio com olivina ou plagioclásio porfírico. Porfírica a glomeroporfírica, com plagioclásio, augia e óxidos de Fe, ± olivina.

2.4 Estratigrafia vulcânica

A estratigrafia de sucessões vulcânicas é utilizada em estudos para o entendimento da colocação e dinâmica eruptiva das lavas, rochas piroclásticas e intrusivas rasas associadas. Estes estudos auxiliam no mapeamento geológico e historicamente na mitigação de desastres em ambientes vulcânicos ativos. Nas décadas de 80 e 90 foram realizados vários estudos da estratigrafia aplicada a sequências vulcânicas (e.g. Fisher & Schmincke, 1984; Cas & Wright, 1987; McPhie *et al.*, 1993), trazendo conceitos sobre os processos e a natureza dos produtos, como características texturais e estruturas, terminologias e técnicas/métodos que possam ser aplicados por outros pesquisadores. Na última década, a estratigrafia de sucessões vulcânicas tem sido também utilizada na investigação de bacias vulcanossedimentares para a prospecção de hidrocarbonetos, permitindo o melhor entendimento da evolução da bacia e do potencial para armazenamento de óleo e gás.

Cada sistema vulcânico possui a sua complexidade, e deste modo, requer a aplicação de diferentes métodos para estabelecimento de sua estratigrafia. No entanto, o uso de diferentes critérios gera, muitas vezes, resultados que não permitem comparação. Desta forma, há a necessidade de utilizar uma metodologia sistemática para o desenvolvimento da estratigrafia vulcânica (Martí *et al.*, 2018).

Um dos métodos utilizados para a construção da estratigrafia é através da descrição sistemática de litofácies e a associação, este conceito foi proposto inicialmente por Miall (1977) para rochas sedimentares siliciclásticas e foi adaptado para a descrição e interpretação de sucessões vulcânicas. Pasqualon *et al.* (2019) utilizaram este método na Ilha da Trindade (Brasil), desenvolvendo uma estratigrafia de detalhe para o Vulcão do Paredão, possibilitando o entendimento da distribuição lateral e vertical das litofácies vulcânicas e da geometria dos depósitos, e gerando um modelo evolutivo para o vulcanismo e a interpretação dos mecanismos eruptivos. Martí *et al.* (1994) propôs sistematizar a estratigrafia vulcânica de Tenerife, uma das melhores exposições de caldeiras vulcânicas no mundo e uma das poucas conhecidas de composição alcalina, através do estabelecimento de unidades estratigráficas formais, utilizando como base os conceitos da estratigrafia convencional. No estudo, foi proposta a divisão dos depósitos em dois grupos (superior e inferior), sendo cada grupo dividido em formações, com base na

associação de fácies, da presença de discordâncias erosionais (*erosional unconformities*) e hiatos deposicionais, mudanças na composição e no estilo eruptivo, e na localização dos centros eruptivos.

2.4.1 Morfologias de derrames básicos/intermediários e ácidos

Dentro do estudo da sucessão vulcânica, um dos objetivos é a identificação morfológica dos derrames, pois estes dados fornecem informações sobre a colocação e a dinâmica eruptiva das lavas. Para lavas basálticas, Macdonald (1953) descreveu no Havai três tipos de derrames, associando-os com uma série gradacional contínua, tendo como membros finais *pahoehoe* e *A'a*, e lava em bloco como um membro intermediário. Posteriormente, foram descritos e classificados outros tipos de derrames transicionais (Figura 6), como *hummocky pahoehoe*, *sheet pahoehoe*, *slabbly pahoehoe* e *rubbly pahoehoe*. Esses tipos intermediários consistem em pequenas variações dos membros finais, como superfícies mais onduladas, superfície rompida com placas crustas ou uma superfície brechada, mas com a base preservada.

Derrames do tipo *pahoehoe* podem ser identificados por suas superfícies em corda, onduladas, lobadas ou suaves. Internamente são divididas em crosta superior, núcleo e crosta inferior (Macdonald, 1953; Aubele *et al.*, 1988; Self *et al.*, 1997). A crosta superior é altamente vesiculada com a quantidade de vesículas diminuindo em direção ao núcleo, enquanto o tamanho delas aumenta. No núcleo, é comum a presença de disjunções colunares bem desenvolvidas e baixa quantidade de vesículas primárias (principalmente derivado de textura diktitaxítica). Uma estrutura que pode ocorrer no núcleo são as de segregação de voláteis (concentração de voláteis no final da cristalização) como *sheet vesicles*, *megascopic vesicles* e *vesicles cylinders*. A crosta inferior é caracterizada por ser pouco espessa e com poucas vesículas, podendo estar presente as *pipe vesicles*.

Derrames do tipo *A'a* podem ser identificados por sua superfície de topo e base escoriáceas e um núcleo maciço. Em comparação com a *pahoehoe*, o núcleo geralmente apresenta menos vesículas, que são irregulares e estiradas na direção do fluxo (Macdonald, 1953).

Derrames do tipo *rubbly pahoehoe* são um tipo intermediário, muito semelhante ao tipo *A'a*, sendo a principal diferença a base do derrame preservada, sem brechas. Esse tipo de lava pode ser dividido internamente em quatro porções (Keszthelyi & Thordarson, 2000 *apud* Barreto, 2016; Duraiswami *et al.*, 2008): (1) crosta inferior vesiculada (comum a presença de *pipe vesicles*) e suavemente preservada, (2) núcleo maciço afanítico com disjunções colunares, (3) porção superior do núcleo vesiculada (blocos vesiculados), e (4) topo brechado.

Para derrames ácidos serão discutidas duas morfologias principais: derrames tabulares e domos ácidos. Os derrames tabulares ácidos podem ser de composição riolítica a dacítica com textura vitrofírica e granofírica, com foliação de fluxo, terminações lobadas, porções com autobrechas, camadas vesiculadas e megavesículas, com a porção do núcleo maciça ou com disjunções colunares (Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2018). Os domos ácidos são compostos por duas fácies principais: (1) fácies afírica na porção interna, de textura vitrofírica e granofírica, com fraturas circulares a onduladas; e (2) fácies autoclástica na porção externa, com brechas vulcânicas angulosas imersas em uma matriz vítrea ou alterada (Fink, 1983; Waichel *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2012, 2018).

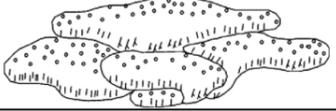
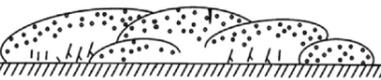
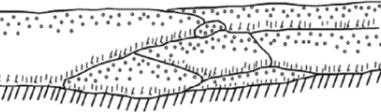
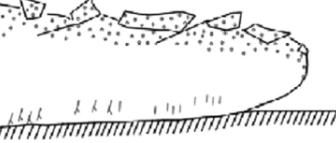
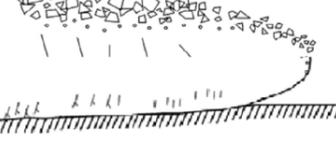
Tipo de lava	Definição	Desenho esquemático	Referências relacionadas	Significado
<i>Pahoehoe</i>	Um termo havaiano que significa lava básica não fragmentada e ondulada que possui superfícies em corda, onduladas, lobadas ou suaves. Lavas <i>pahoehoe</i> são compostas de diversas unidades.	Unidades múltiplas constituindo lavas <i>pahoehoe</i> 	Macdonald (1953) Walker (1993) Self <i>et al.</i> (1998) Jay <i>et al.</i> (2009) Vye-Brown <i>et al.</i> (2013a,b)	Estas feições de superfície ocorrem devido a movimentação da lava fluida abaixo da crosta da superfície congelada. Este é um tipo de lava composta.
<i>Hummocky pahoehoe</i>	Uma variedade de lava <i>pahoehoe</i> que consiste em dedos de lavas, pequenos lobos e tumuli. A superfície desse tipo de lava é suave, bun-like e <i>hummocky</i>	Superfície <i>hummocky</i> suave 	Swanson (1973) Bondre <i>et al.</i> (2004) Duraismami (2009)	Este tipo de fluxo composto se forma ou sob taxas baixas de efusão ou devido a paleotopografia ondulada.
<i>Sheet pahoehoe</i>	Uma variedade de lava <i>pahoehoe</i> que consiste de grandes lobos tabulares e unidades espessas de lençóis de lavas. As unidades são empilhadas umas sobre as outras e formam uma geometria tabular plana.	Superfície plana, suavemente ondulada 	Aubele <i>et al.</i> (1988) Self <i>et al.</i> (1998) Duraismami (2009)	Inflação e coalescência de lobos de lavas que originam <i>sheet</i> lobos com topos suavizados e típica estrutura interna em tripartite (crosta-núcleo-zona de <i>pipes</i> na base)
<i>Slabby pahoehoe</i>	Essas lavas contêm uma série de placas regularmente espaçadas, com poucos metros de diâmetro e de espessura. Essas placas em geral estão quebradas e inclinadas graças ao movimento de massa ou drenagem da lava subjacente.	Superfície rompida com placas crustais 	Peterson & Tilling (1980) Guilbaud <i>et al.</i> (2005)	Este é considerado um tipo de lava gradacional entre <i>pahoehoe</i> e 'a'ā, o qual exibe característica predominante de lavas <i>pahoehoe</i> , embora com uma crosta de topo rompida (escoriácea)
<i>Rubblly pahoehoe</i>	Derrames com bases preservadas e crosta superior brechada constituem um tipo morfológico que difere em características daquelas típicas <i>pahoehoe</i> e 'a'ā	Superfície brechada e base preservada 	Managave (2000) Keszthelyi & Thordarson (2000) Guilbaud <i>et al.</i> (2005) Duraismami <i>et al.</i> (2008)	Tipo de lava transicional entre <i>pahoehoe</i> e 'a'ā que foi colocada sob taxas de efusão ligeiramente mais altas que aquelas das lavas <i>pahoehoe</i>
'A'ā	'A'ā é um termo havaiano que significa lava áspera e pedregosa. Esta representa uma dos três tipos de derrames básicos, cuja superfície é composta de lava <i>clinker</i> quebrada.	Superfície escoriácea irregular na base e topo 	Macdonald (1953) Walker (1993)	Derrames 'a'ā são geralmente os mais viscosos de todos os tipos morfológicos e avançam mais lentamente que os derrames <i>pahoehoe</i> sob mesmas condições de declividade

Figura 6 - Classificação de derrames básicos com base na morfologia (extraído de Barreto, 2016, traduzido de Duraismami et al., 2014)

2.5 Padrões de porosidade em rochas vulcânicas

Segundo McPhie *et al.* (1993), rochas vulcânicas podem ser texturalmente divididas em 2 categorias: coerentes ou vulcanoclásticas. O termo vulcanoclástico é descritivo e está relacionado com depósitos de fragmentos vulcânicos, independente de aspectos genéticos (Fisher, 1961 *apud* McPhie *et al.*, 1993). Depósitos vulcanoclásticos podem ainda ser divididos em quatro categorias: autoclástico, piroclástico, ressedimentado e sedimentar vulcanogênico. Esta grande variedade está relacionada aos complexos processos de *emplacement*, refletindo na heterogeneidade do sistema poroso dos reservatórios não-convencionais vulcânicos. (Zou *et al.*, 2013; Becker, 2017).

Em relação ao espaço poroso, este pode ser caracterizado como (1) primário: relacionado à ascensão do magma e o *emplacement* na superfície; ou (2) secundário: formado em processos após o *emplacement*, como alteração e fraturamento tectônico. A porosidade primária pode ser do tipo vesicular (liberação de voláteis), intra-cristal/móldica (dissolução deutérica), intra-fragmento (auto-brechas) e de fraturas (por resfriamento e *quenching*). Processos secundários estão relacionados a alterações (reações diagenéticas, intemperismo, hidrotermal) e fraturamento. Esses processos são responsáveis por modificar ou criar poros, através da dissolução dos minerais primários (intracristalina/móldica ou intra-matriz) e/ou dissolução de fragmentos de lava em uma autoclástica (intra e inter-fragmentos). Também está associado às fraturas tectônicas e a precipitação de minerais secundários, que podem obstruir parcialmente ou totalmente a porosidade e permeabilidade (Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga & Rubinstein, 2007; Couves *et al.*, 2016; Becker, 2017; Barreto *et al.*, 2017; Pasqualon, 2017; Becker *et al.*, 2019, Rossetti *et al.*, 2019). O Quadro 2 apresenta um resumo da classificação da porosidade e dos processos primários e secundários.

Quadro 2 - Processos primários e secundários e a sua porosidade resultante em rochas vulcânicas (Sruoga & Rubinstein, 2007).

Origem	Processo		Tipo de porosidade
Primário	<i>Welding</i>		<i>Intershard e Intrapumice</i>
	Dissolução deutérica de cristais		Intra-cristal ou móldica
	Liberação de voláteis		Vesicular e <i>Gas Pipe</i>
	Fragmentação	Fragmentação de Fluxo	<i>Interflow Laminar/Tension Cracks Cavitation</i>
		Brechas autoclásticas	Inter-clasto
		Fragmentação de fenocristais	Cristal fragmentado
Secundário	Alteração Meteórica Diagenética Hidrotermal	Dissolução e precipitação de minerais secundários	<i>Spongy a Cavernous Lacy</i>
		Precipitação de minerais secundários nos poros	<i>Drusy</i>
		Remoção mecânica de minerais secundários	Peneira a móldica
	Fratura	Tectônica	Fratura tectônica
		<i>Quenching</i>	Fratura <i>quench</i>
		Brecha hidrotermal	Brecha <i>drusy</i>

Os estudos sobre o sistema permo-poroso das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral são recentes, esses estudos utilizaram técnicas como porosímetro-permeâmetro, microtomógrafo e ondas acústicas, e tiveram como foco principal as litologias básicas (ex: Barreto *et al.*, 2017; Rossetti *et al.*, 2019; Becker *et al.*, 2019). Porém, para as vulcânicas ácidas da Fm. Palmas esses dados ainda são escassos. Segundo os trabalhos de Becker *et al.* (2019) e Rossetti *et al.* (2019), as análises mostram uma porosidade relativamente mais alta para a crosta superior e inferior de lavas básicas (> 10%), enquanto as maiores porosidades encontradas são das

porções superiores de *rubbly pahoehoe* (28,3%) e *pahoehoe* (26,6%); já para as vulcânicas ácidas, a porosidade varia de 0,11% a 9,38%. No geral, as rochas ácidas e básicas apresentam permeabilidade baixa (<1 mD), e estes valores baixos podem estar associados à precipitação de minerais secundários (Becker *et al.*, 2019; Rossetti *et al.*, 2019).

2.6 Sistemas vulcânicos em bacias petrolíferas

Nos últimos anos, o interesse nos sistemas vulcânicos em bacias vulcanossedimentares se intensificou devido à possibilidade destes apresentarem características permo-porosas compatíveis com rochas reservatórios ou selos de hidrocarbonetos. Existem mais de 300 casos no mundo onde os reservatórios de óleo e gás estão associados a rochas vulcânicas (eg. Schutter, 2003; Liu *et al.*, 2013, Zou *et al.*, 2013). Estudos destes sistemas têm sido realizados em diversos países como na Austrália, China, Namíbia, Japão, Argentina e México. Um exemplo relacionado às Grandes Províncias Ígneas é o estudo das Deccan Trapps, na Índia, onde os reservatórios de óleo estão condicionados às fraturas e vesículas dos produtos vulcânicos, como lavas, intrusivas e rochas piroclásticas (Sruoga *et al.*, 2004; Farooqui *et al.*, 2009; Lenhardt & Götz, 2011; Zou *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015). Recentemente, no Brasil, foram descobertos reservatórios vulcânicos no pré-sal, magmatismo que ocorreu durante a separação do supercontinente Gondwana, há aproximadamente 126 Ma. Na Bacia de Campos, por exemplo, os campos de Badejo e Linguado produzem a partir de derrames de rochas básicas, vesiculares e fraturadas (Mizusaki, 1986; Moreira *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2008; Riccomini *et al.*, 2012; Reis *et al.*, 2014).

3 MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia do projeto, sendo dividido em três etapas: pré-campo, campo e pós-campo. As etapas foram então subdivididas em tópicos e detalham os métodos utilizados para a obtenção dos dados.

3.1 Pré-campo

3.1.1 Revisão bibliográfica

A etapa de levantamento bibliográfico se estendeu durante toda a realização do projeto foram revisados trabalhos sobre a geologia regional e local, abordando temas sobre a Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE) e o Grupo Serra Geral, assim como conceitos de vulcanologia, estratigrafia e padrões de porosidade em rochas vulcânicas. O *software* Mendeley foi utilizado para a organização dos artigos. O embasamento teórico focou nos seguintes temas:

- **Grandes Províncias Ígneas:** foram abordados aspectos gerais, como definições, características e classificações.
- **Província ígnea Paraná-Etendeka:** para a província foram estudados aspectos como a extensão areal e volume da província vulcânica, idades, correlação cronoestratigráfica deste grupo na Bacia do Paraná.
- **Grupo Serra Geral:** foram revisados estudos sobre a estratigrafia informal, baseada em parâmetros geoquímicos; e principalmente sobre a estratigrafia formal (litoestratigrafia), baseada na arquitetura de fácies, aspectos morfológicos das lavas e características petrográficas.
- **Estratigrafia vulcânica:** foram abordados conceitos sobre litofácies vulcânicas e a associação destas, com o objetivo de ajudar na descrição e interpretação de sucessões vulcânicas.

- **Padrões de porosidade em rochas vulcânicas:** foram estudados depósitos vulcânicos, processos primários (ascensão do magma e o *emplacement*) e secundários (após o *emplacement*) e a sua relação com o espaço permoporoso que ocorre nessas rochas.
- **Reservatórios não-convencionais vulcânicos:** foram estudadas as características dos reservatórios não-convencionais vulcânicos em diversas bacias no mundo, buscando entender como as rochas vulcânicas estão associadas ao sistema petrolífero (como reservatório, selo ou fonte de maturação). Foram revisados os métodos de estudos para construção da estratigrafia, descrição e associação de litofácies, padrões de porosidade em sistemas vulcânicos com objetivo de aplicar estes métodos na área de estudo, e relacionar os padrões de porosidade com as litofácies.

3.1.2 Sensoriamento remoto

Nesta etapa foram identificados os perfis e possíveis afloramentos em imagem de satélite no *software* Google Earth Pro 7.3. Esta etapa foi fundamental para um bom planejamento da etapa de campo.

3.2 Campo

3.2.1 Levantamento estratigráfico

Foram realizadas 2 campanhas de campo para a região do distrito de Criúva (Caxias do Sul, RS), entre o período de 3 a 6 de dezembro de 2021 e entre 29 de junho a 1 de julho de 2022. Durante essa etapa, foram levantadas 3 seções colunares, em dois perfis diferentes, em escala variáveis (1:500, 1:1250 e 1:2500), para representar as diferentes litofácies da sucessão vertical das rochas vulcânicas. As seções foram acompanhadas de descrições da litologia, estruturas, texturas e caracterização visual dos poros (tamanho, geometria, distribuição espacial e ocorrência de amígdalas) (Figura 7). As atitudes das estruturas foram obtidas com uma bússola Brunton TruArc 15. Para a descrição de litofácies, foi utilizado um código de pelo menos duas letras, na qual a maiúscula corresponde a composição

litológica e a minúscula se refere aos aspectos estruturais e/ou texturais. Este modelo de descrição baseia-se na metodologia de Mcphie (1993) (Figura 8).

Ponto/Seção: Localização:		Data: Escala: 1:50	UTM:		
<p style="text-align: center;">Areia</p> <p style="text-align: center;">Bl Sx Gr G M F Mf S Ag</p> <p>11</p> <p>10</p> <p>9</p> <p>8</p> <p>7</p> <p>6</p> <p>5</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>Bloco/ bomba Lapilli Cinza</p>		Fácies	Ass. Fácies	Estruturas / Fotos	Descrição

Figura 7 - Planilha utilizada para o levantamento estratigráfico em campo.

Nomes descritivos para lavas coerentes e intrusões



- (1) COMPOSIÇÃO
- estimado com base na assembleia de fenocristais.
 - para rochas afaníticas, estimado com base na cor.
- (2) LITOFÁCIES
- maciço ou foliação de fluxo.
 - fraturas.
 - traveseiros ou pseudo-traveseiros (*pillows*).
- (3) TEXTURA
- porfírico (fenocristais e matriz).
 - afanítico.
 - vítreo.
 - não vesicular ou vesicular (ou amigdalóide).
- (4) ALTERAÇÃO
- mineralogia.
 - distribuição.

Figura 8 - Modelo utilizado para as litofácies (modificado de Mcphie *et al.*, 1993)

3.2.2 Registro fotográfico e amostragem

Durante o levantamento estratigráfico em campo, foram realizados o registro fotográfico e a amostragem das diferentes litofácies. Os afloramentos foram localizados com um GPS Garmin 60CSx com precisão de 3 m.

3.3 Pós-campo

3.3.1 Preparação de amostras

Foram selecionadas 13 amostras para a confecção de lâminas delgadas com 30 µm de espessura e impregnadas com resina azul, com o objetivo de descrever as texturas em escala microscópica e também analisar a microporosidade da rocha. As

amostras foram cortadas com uma serra diamantada com o auxílio do Prof. Dr. Heinrich Frank.

3.3.2 Tratamento dos dados de campo

As seções colunares levantadas durante o campo foram digitalizadas com o *software* Adobe Illustrator, dentro do programa se construiu as *plates* de fotografias para as litofácies.

3.3.3 Petrografia

Na etapa de petrografia das lâminas delgadas impregnadas foi utilizado um microscópio petrográfico sob luz transmitida (Leitz Laborlux 12) para a descrição das lâminas. O enfoque da descrição foi a classificação litológica, descrição de aspectos texturais e estruturais, e caracterização e quantificação da porosidade, através da contagem modal de 300 pontos. Para a classificação da porosidade, a terminologia foi baseada nos estudos de Sruoga & Rubinstein (2007) e Barreto *et al.* (2017). Nesta etapa foram adquiridas fotomicrografias das lâminas para a confecção de *plates* de fotos para o trabalho.

3.3.4 Integração dos dados

Nesta última etapa ocorreu a integração dos dados, com o objetivo de interpretar e discutir os resultados. A integração foi realizada por meio de planilhas e imagens digitalizadas dos perfis colunares levantadas na etapa de campo. A digitalização permitiu uma melhor interpretação das litofácies e a associação entre elas, assim como uma melhor representação das texturas, estruturas e dos padrões de porosidade e a sua distribuição no arcabouço estratigráfico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados adquiridos em trabalho de campo e laboratório. Durante essas atividades foram realizados 48 pontos, 3 seções colunares em 2 perfis, denominados de Perfil Cachoeira da Mulada e Perfil Criúva – Ponte dos Korff – São Manoel (Figura 9). Os pontos visitados, com suas respectivas coordenadas e cotas de altitude, além da relação de amostras coletadas e lâminas confeccionadas, estão agrupadas no APÊNDICE A.

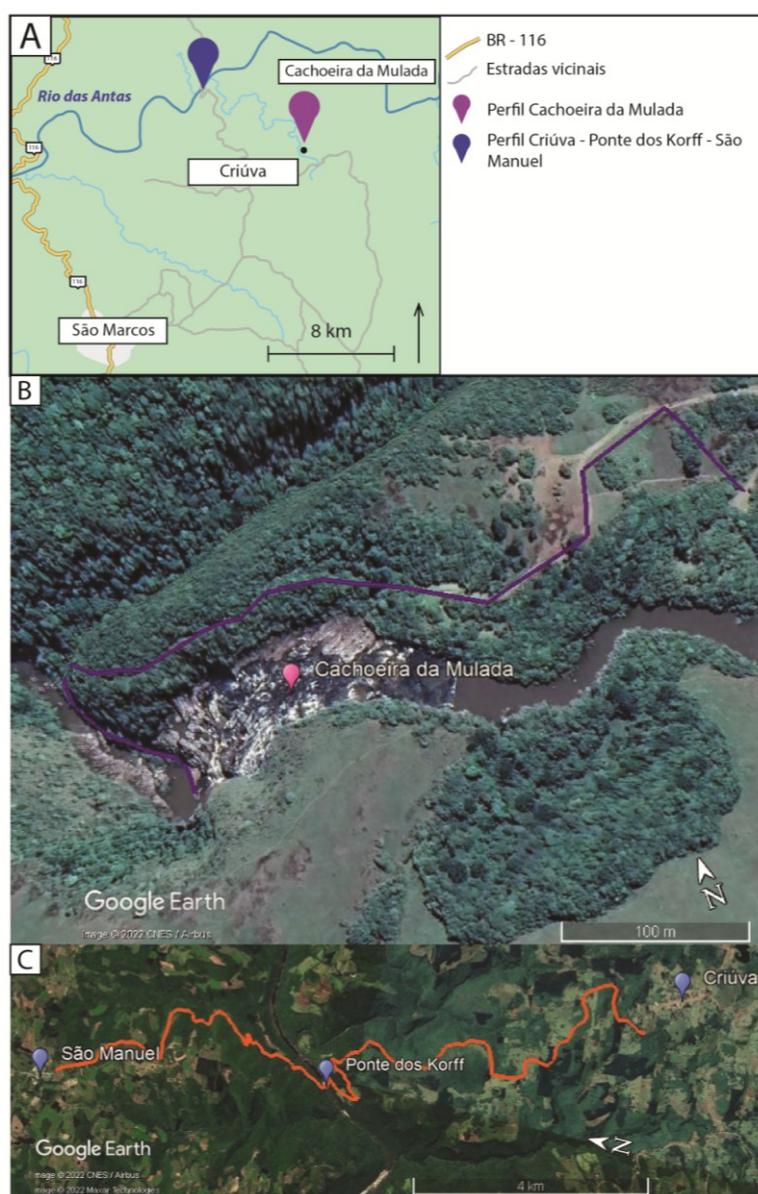


Figura 9 – A) Localização dos perfis e do ponto PM01 (mapa baseado no Google Maps). B) Perfil Cachoeira da Mulada (Google Earth Pro). C) Perfil Criúva – Ponte dos Korff – São Manoel (Google Earth Pro) (Fonte: autor).

4.1 Estratigrafia

O arcabouço estratigráfico da região de Criúva foi construído a partir de 3 seções colunares em 2 perfis (Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13). Foram reconhecidas 10 litofácies e agrupadas em 3 associações de fácies. As descrições de campo dos afloramentos estão inseridas no **APÊNDICE B**.

4.1.1 Litofácies

A partir do levantamento de seções colunares foram identificadas 10 litofácies, sendo 7 vulcânicas ácidas (5 coerentes e 2 vulcanoclástica) e 3 vulcânicas básicas (2 coerentes e 1 vulcanoclástica do tipo autobrecha). As descrições e interpretações das litofácies estão presentes no Quadro 3.

Na seção colunar Cachoeira da Mulada (Figura 10), na porção inferior foi descrita uma sequência básica de basaltos afaníticos brechados (Bbr), com blocos vesiculados (Bbv) e maciços (Bm). Na porção superior, foram descritas rochas ácidas classificadas como dacitos com textura afanítica e estruturas subverticais (Das), sub-horizontais (Dah) e porfíricas maciças (Dpm). No perfil Criúva – Ponte do Korff e São Manuel (Figura 13), na qual contempla duas seções colunares (Figura 11 e Figura 12), foram observadas as mesmas litofácies e três novas, dacitos com textura vitrofírica e porfírica (Dvtp), vesicular (Dv) e a Dvtv, um dacito vitrofírico vesiculado. A litofácies Dbv, um dacito com blocos vesiculados e localmente com textura *jigsaw-fit* foi identificada no afloramento do ponto PM01, onde estava associado com a litofácies Das.

A litofácies Bbr (Figura 14A) consiste em uma superfície de brecha composta por fragmentos subangulosos a subarredondados de basaltos de textura afanítica com amígdalas e vesículas, os fragmentos estão cimentados pela própria lava e por zeólita. Interpretado como o topo brechado de um derrame do tipo *Rubbly Pahoehoe*.

A litofácies Bbv (Figura 14B) consiste em blocos subarredondados (autólitos) ricos em amígdalas preenchidas por zeólita, imersos em uma matriz afanítica maciça. Interpretado como a porção de topo do núcleo do derrame do tipo *Rubbly Pahoehoe*.

A litofácies Bm (Figura 14C) consiste em um basalto afanítico a muito fino, maciço com vesículas esparsas esféricas. Interpretado como o núcleo do derrame do tipo *Rubbly Pahoehoe*.

A litofácies Das (Figura 15A) possui uma estrutura subvertical, interpretada como relacionada a um regime de intrusão. O bandamento possui dobras internas marcado por bandas mais claras e bandas mais escuras-avermelhadas evidenciando uma diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação (conteúdo de óxidos). As amígdalas são pouco presentes, de tamanho milimétrico e possuem um formato esférico a levemente oval. Interpretada como os condutos alimentadores das lavas ácidas da Fm. Palmas

A litofácies Dbv (Figura 15B) consiste em blocos vesiculados com amígdalas esféricas a irregulares preenchidas por zeólita. Textura vítrea oxidada e localmente ocorrem textura *jigsaw-fit* cimentado também por zeólita. Interpretados como autólitos associados ao sistema de alimentação dos derrames ácidos

A litofácies Dah (Figura 15C) possui uma estrutura sub-horizontal, interpretada como uma foliação de fluxo e um bandamento marcado por bandas mais claras e bandas mais escuras-avermelhadas evidenciando uma diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação (conteúdo de óxidos). As amígdalas são pouco presentes, de tamanho milimétrico e possuem um formato esférico a levemente oval. Interpretada como derrames laminares, em porções mais afastadas do centro vulcânico.

A litofácies Dpm (Figura 15D) possui textura porfírica com matriz afanítica e uma estrutura maciça (sem estrutura de fluxo), apresenta também textura de desvitrificação. Interpretada como uma porção interna de um derrame ácido.

A litofácies Dvtp (Figura 15E) possui textura vitrofírica e glomeroporfírica, predominantemente maciça e localmente com estrutura de fluxo sub-horizontal marcada

pela desvitrificação das bandas. Interpretada como uma porção externa (base ou topo) de um derrame ácido.

A litofácies Dvtv (Figura 16) possui textura vitrofírica (muito alterada de cor verde) com vesículas preenchidas por zeólita e feições autoclásticas.

A litofácies Dv (Figura 21B) possui textura afanítica vesicular, as vesículas são estiradas e crescem em tamanho para o centro do derrame. Interpretada preliminarmente, com base na geometria do corpo e padrão das vesículas como lobos ácidos.

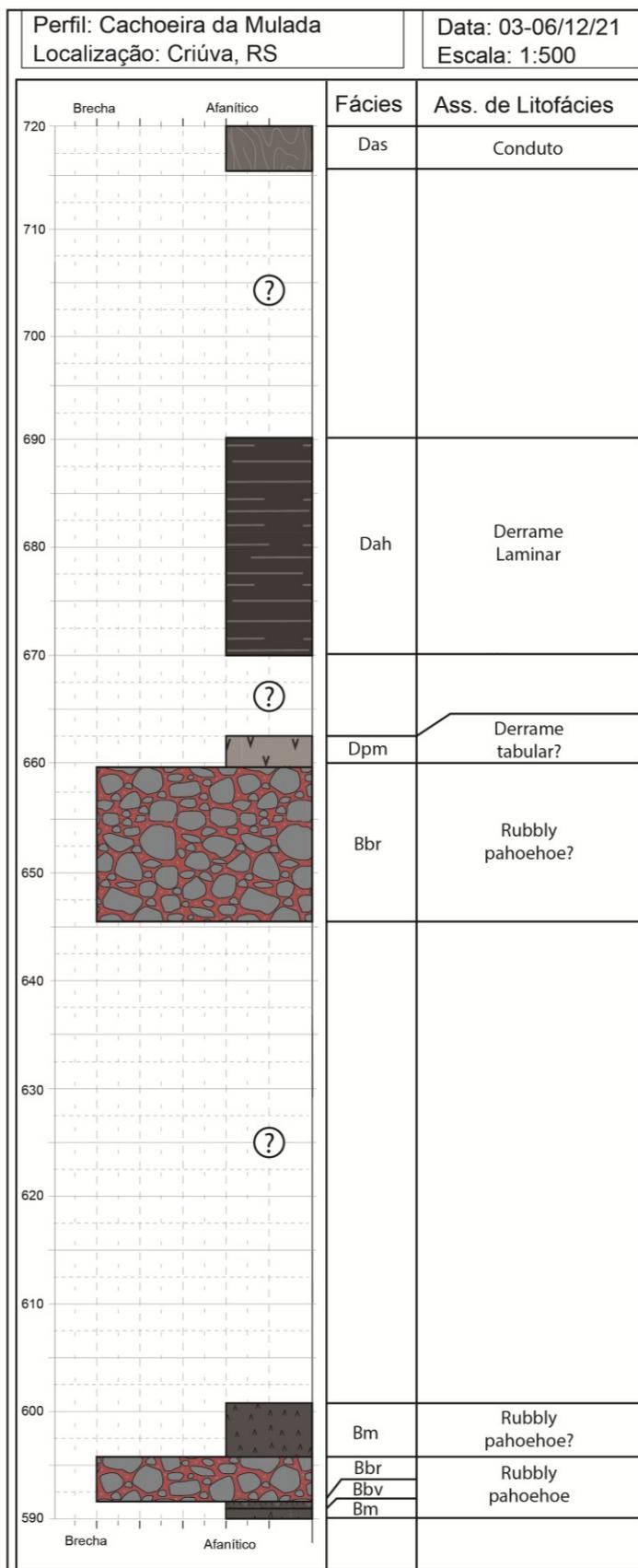


Figura 10 – Seção colunar Cachoeira da Mulada, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).

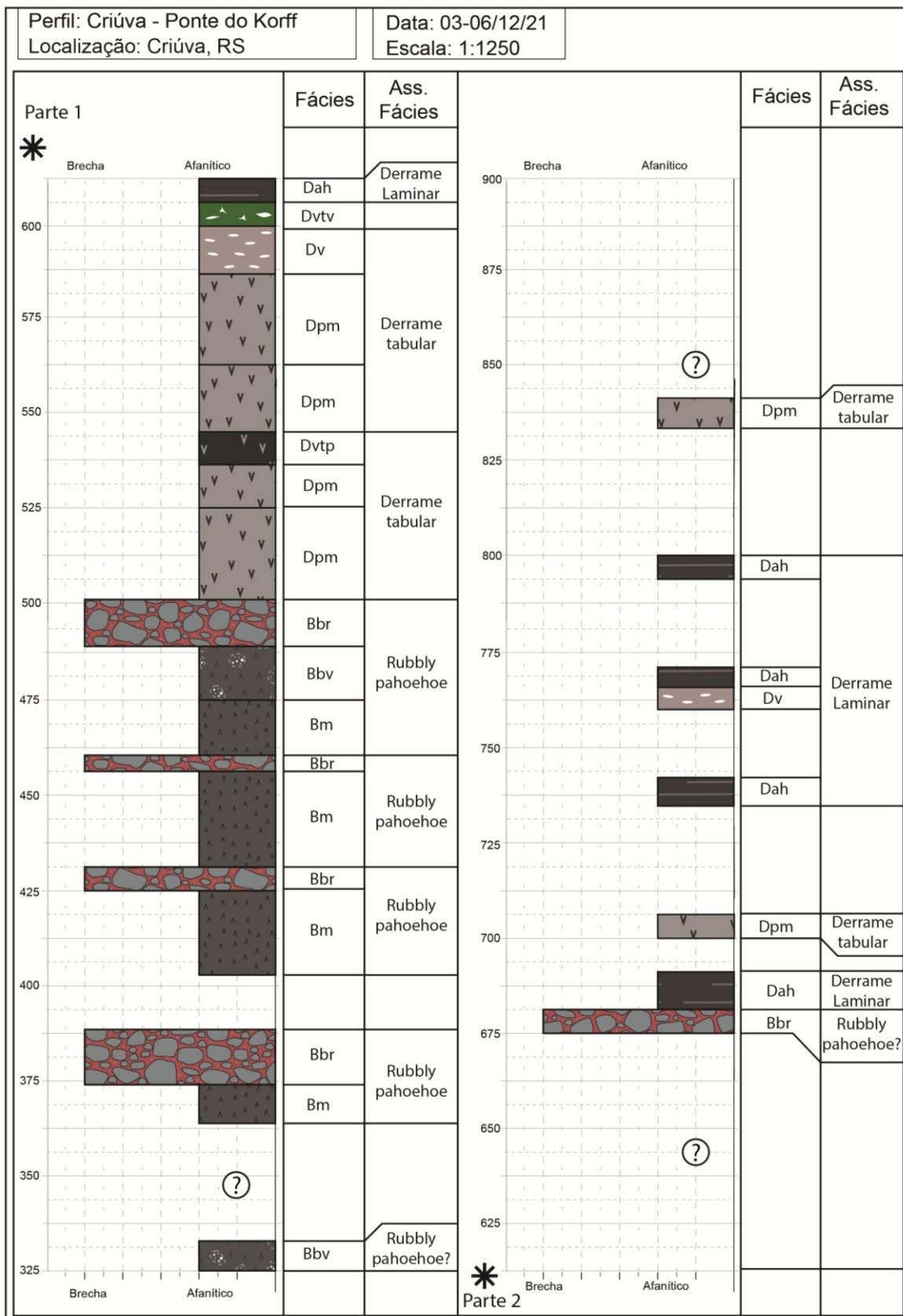


Figura 11 - Seção colunar Criúva – Ponte dos Korff, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).

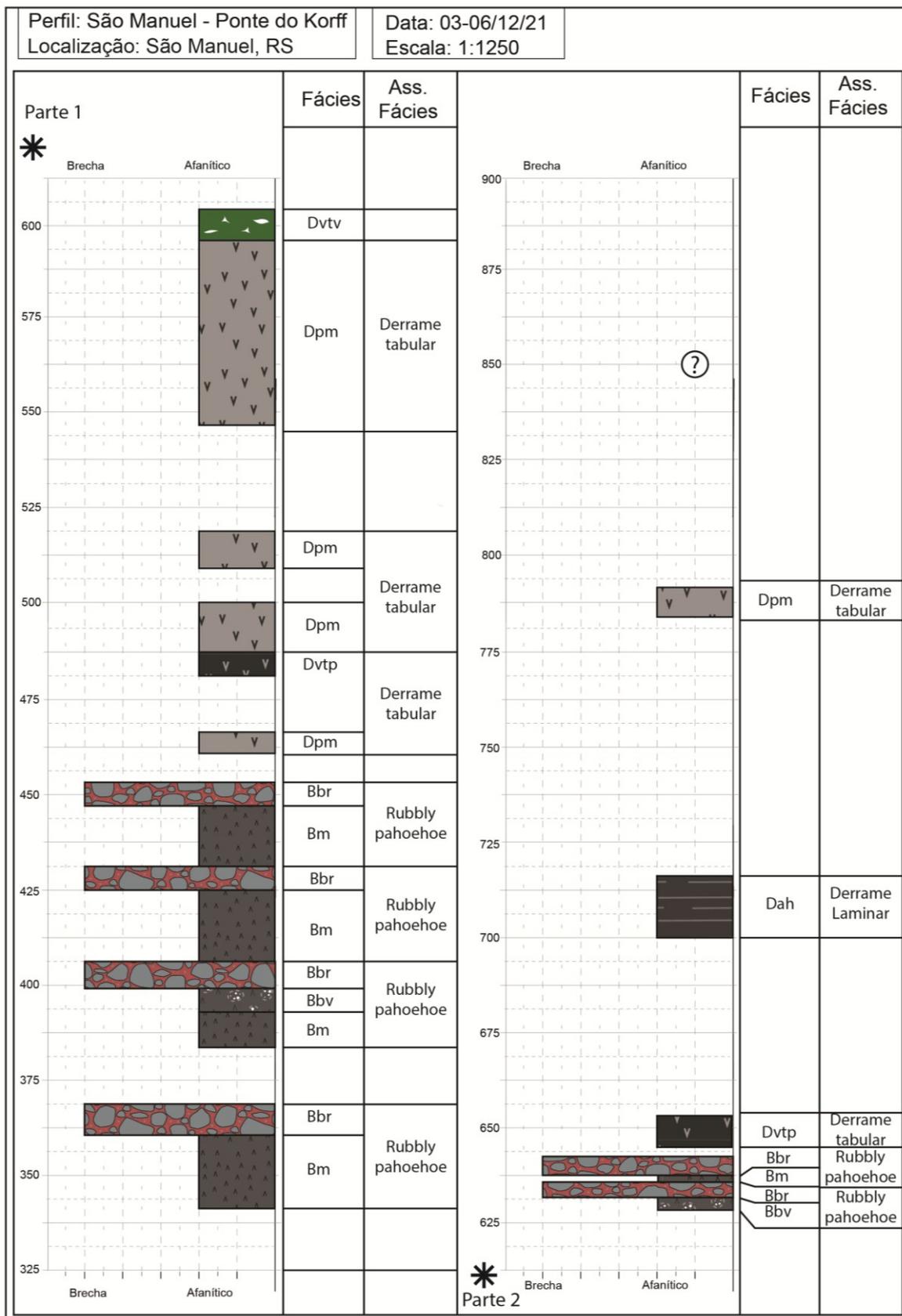


Figura 12 - Seção colunar São Manuel – Ponte dos Korff, com as litofácies e associações identificadas (Fonte: autor).

Perfil Criúva - Ponte do Korff - São Manuel

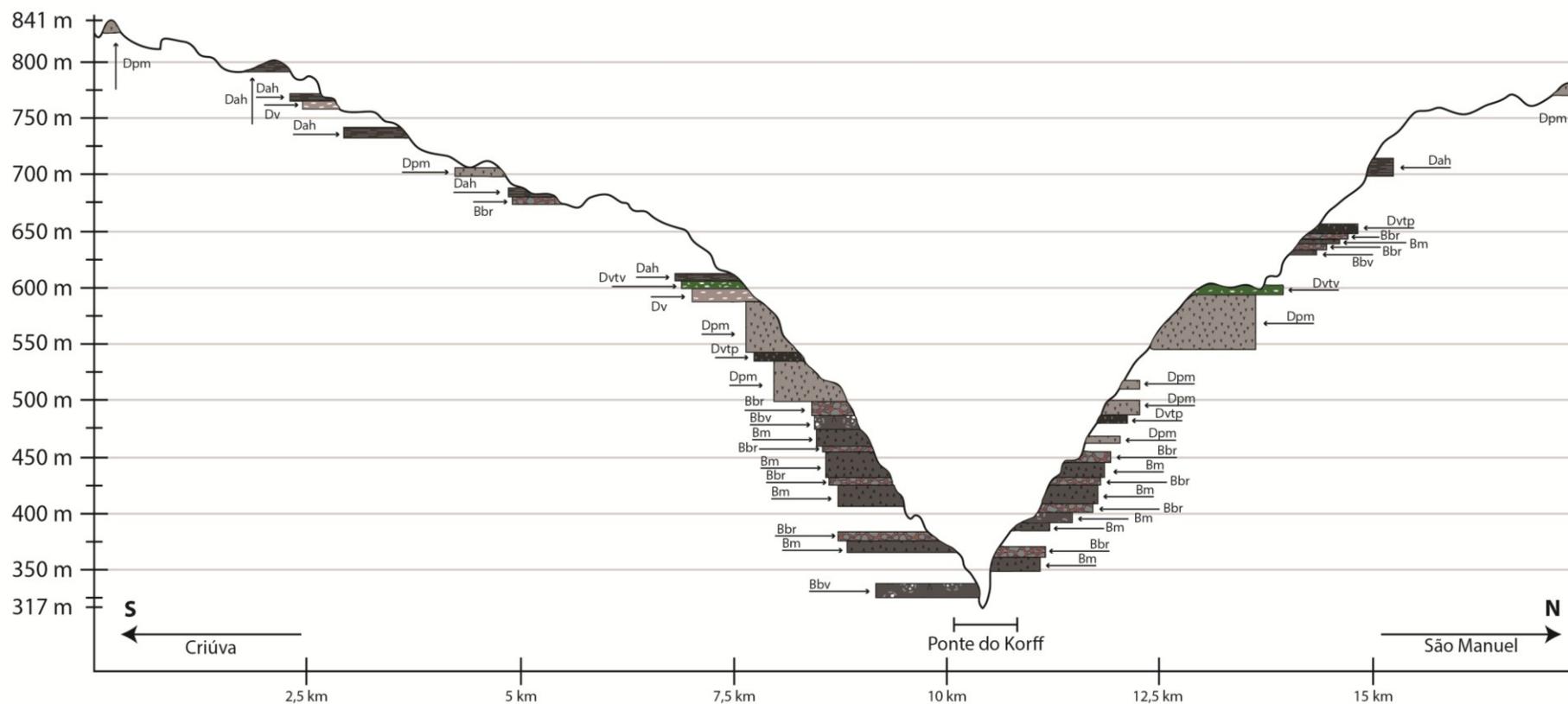


Figura 13 - Perfil esquemático Criúva – São Manuel – Ponte dos Korff, com os pontos e as litofácies identificadas (Fonte: autor).

Quadro 3 - Litofácies, descrição e interpretação das fácies deste trabalho (Fonte: autor).

Litofácies	Descrição	Interpretação
Das	Dacito afanítico com foliação milimétrica subvertical com dobras internas a foliação, foliação é marcada pela desvitrificação e conteúdo de óxidos. Conteúdo de amígdalas baixo e de tamanho milimétrico.	Rocha subvulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> , em regime de fluxo linear, com dobras relacionadas à viscosidade e ao regime de intrusão. Associada aos sistemas de alimentação de lavas ácidas.
Dah	Dacito afanítico com foliação milimétrica sub-horizontal marcada pela desvitrificação e conteúdo de óxidos. Conteúdo de amígdalas baixo e de tamanho milimétrico.	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> , em regime de fluxo linear. Estrutura horizontalizada sugere um <i>emplacement</i> em uma paleotopografia horizontal. Associada aos derrames laminares.
Dpm	Dacito porfirítico maciço (localmente mais fino), com textura glomeroporfirítica e com porções da matriz desvitrificada, cor cinza, com esparsas vesículas milimétricas. Localmente foram observados plagioclásios com textura em peneira.	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> . Possivelmente associada as porções mais internas de um derrame ácido.
Dbv	Dacito com blocos vesiculados estirados, preenchidos por zeólita, imersos em uma matriz vítrea oxidada, localmente ocorrem textura <i>jigsaw-fit</i> que são cimentados por zeólita.	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> em uma situação de supersaturação de voláteis, blocos são autólitos do próprio magma e foram estirados pelo fluxo do regime de intrusão da litofácies Das.
Dv	Dacito com vesículas estiradas na borda, crescendo em direção ao centro do derrame, textura afanítica.	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> em uma situação de supersaturação de voláteis. Geometria do corpo e padrão das vesículas sugere lobos ácidos.
DVtp	Dacito com textura vitrofírica maciço, com textura glomeroporfirítica (plagioclásio e subordinadamente ortopiroxênio)	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> , associado as porções mais externas de um derrame ácido

	com esparsas amígdalas milimétricas.	(topo ou base).
Dvtv	Dacito vitrofírico vesiculado, muito alterado de cor verde, vesículas preenchidas por zeólita e feições autoclásticas.	Rocha vulcânica gerada por elevado <i>undercooling</i> em uma situação de supersaturação de voláteis.
Bbr	Basalto brechado com fragmentos subangulosos a subarredondados, cor avermelhada, oxidada com conteúdo de amígdalas alto de tamanho milimétrico.	Rocha vulcanoclástica do tipo autobrecha, gerada na porção superior de derrames do tipo <i>rubbly pahoehoe</i> .
Bbv	Basalto com blocos vesiculados, textura afanítica, de cor cinza composto por blocos vesiculados (“autólitos”)	Rocha vulcânica gerada em uma situação de supersaturação de voláteis na porção superior do núcleo do derrame.
Bm	Basalto maciço com textura afanítica a muito fina, de cor cinza, com esparsas amígdalas de formato esférico a oval. Localmente foram observados plagioclásios com textura em peneira.	Rocha vulcânica gerada em uma situação de baixa saturação de voláteis e grau de cristalização um pouco mais alto, na porção interna do núcleo do derrame.

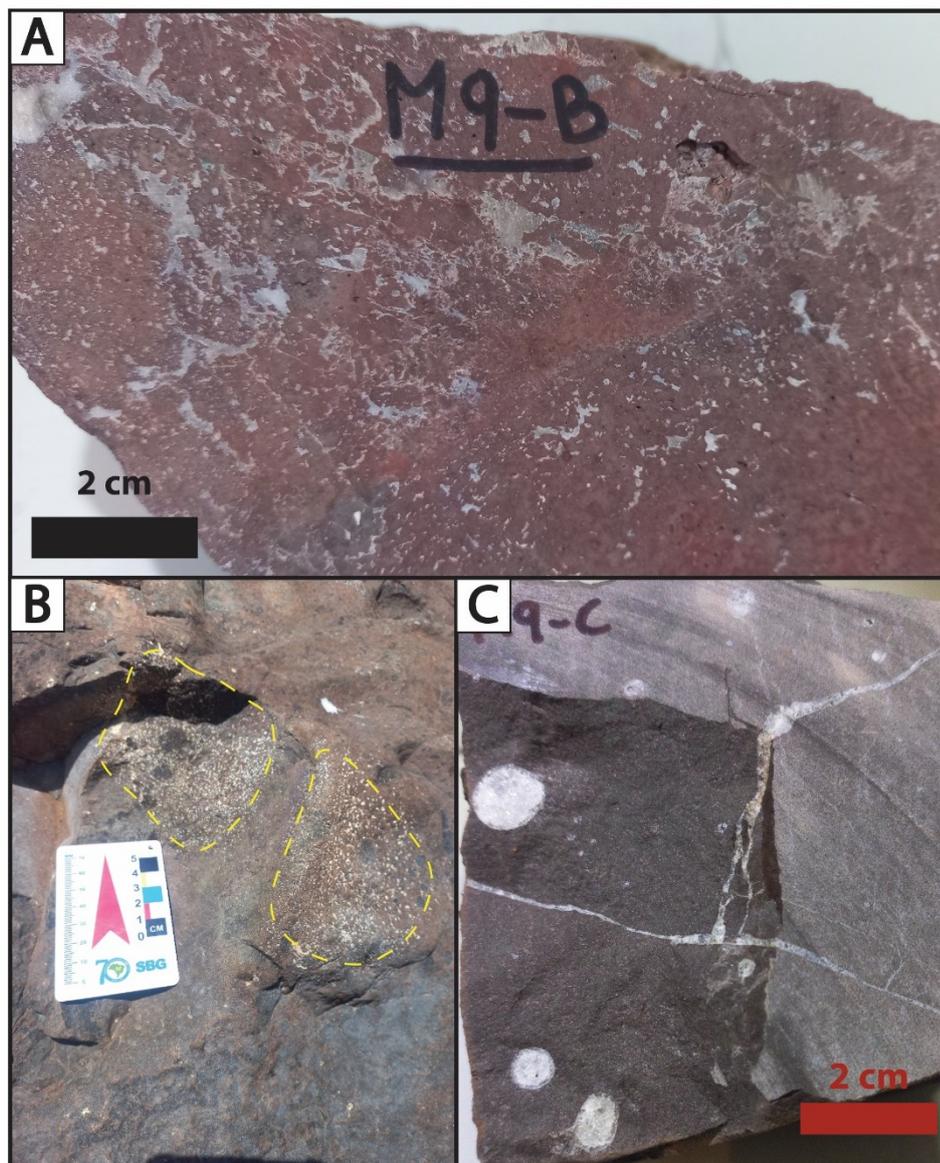


Figura 14 - Litofácies básicas identificadas. A) Basalto brechado (Bbr). B) Basalto com blocos vesiculados (Bbv). C) Basalto maciço (Bm) (Fonte: autor).

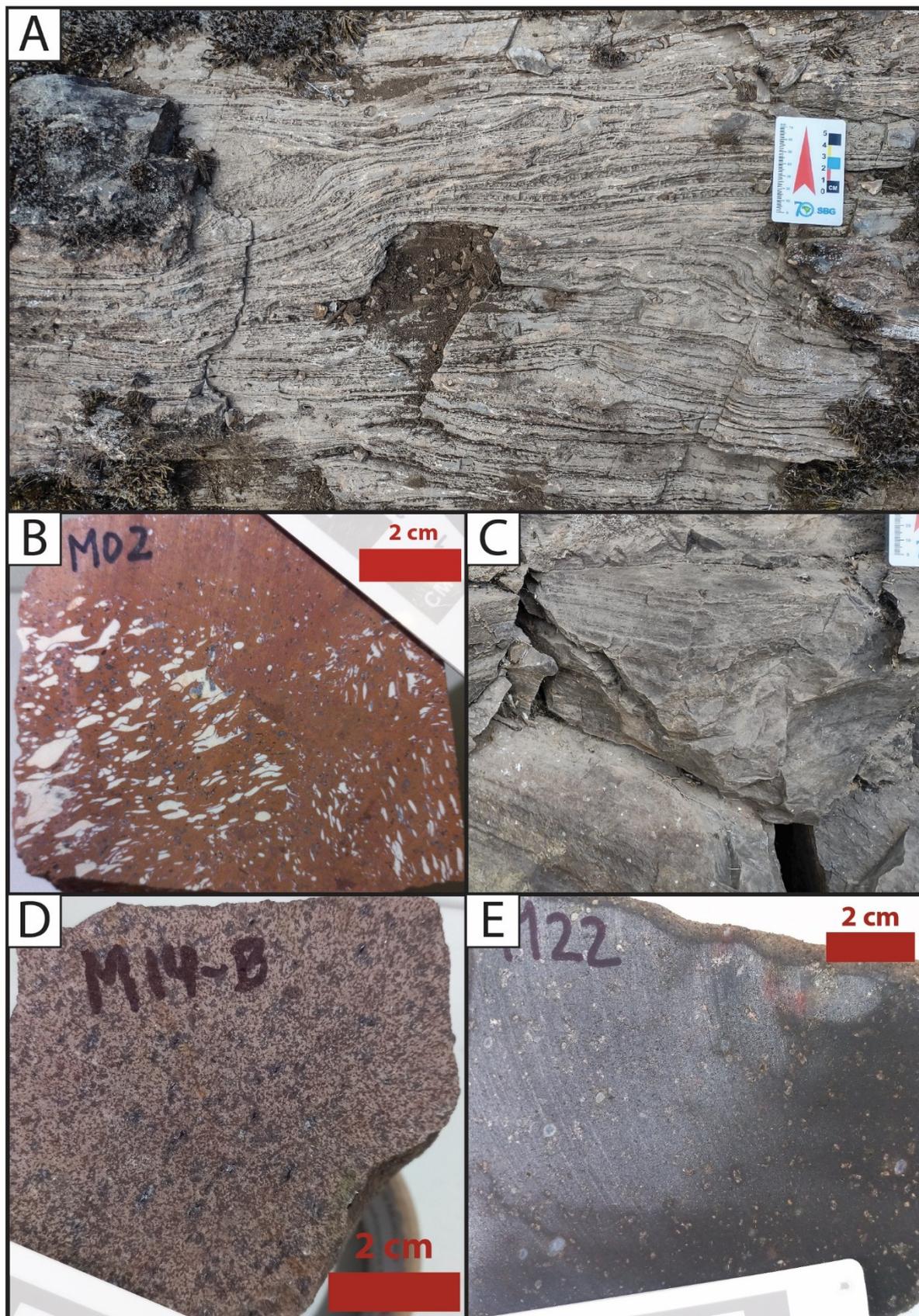


Figura 15 - Litofácies ácidas identificadas. A) Dacito afanítico subvertical (Das) – Imagem em planta. B) Dacito com blocos vesiculados (Dbv). C) Dacito afanítico sub-horizontal – Imagem em perfil. D) Dacito porfírico maciço (Dpm). E) Dacito vitrofírico porfírico (Dvtp) (Fonte: autor).



Figura 16 – Detalhe da litofácies Dvtv, textura vitrofírica com alteração de cor verde. (Fonte: autor)

4.1.2 Associação de litofácies

Foram interpretadas 3 associações de litofácies na região: derrames básicos do tipo *rubbly pahoehoe*, derrames tabulares dacíticos e sistemas de alimentação de derrames ácidos (condutos e derrames laminares). Os condutos ácidos estão melhor expostos no ponto PM01 e ocorrem no topo da sequência do Perfil Cachoeira da Mulada (CM); enquanto que os derrames laminares, *tipo rubbly pahoehoe* e tabular dacíticos ocorrem em ambos os perfis CM e Criúva – Ponte dos Korff – São Manuel (CKM).

A associação de litofácies Bbr, Bbv e Bm foi interpretada como relacionada a um derrame básico do tipo *rubbly pahoehoe* (Figura 17). A Bbr corresponde a superfície brechada de topo de derrame, composta por fragmentos basálticos afaníticos cimentados pela própria lava e por zeólita. A Bbv está relacionada ao topo vesiculado, composta por blocos ricos em amígdalas subarredondados (autólitos) imersos em uma matriz afanítica. A Bm corresponde ao núcleo maciço do derrame, com textura afanítica e amígdalas esféricas esparsas. A associação de litofácies

descrita acima já foi identificada por outros autores como sendo características para a morfologia de derrames do tipo *rubbly pahoehoe* (Keszthelyi & Thordarson, 2000 *apud* Barreto, 2016; Duraiswami *et al.*, 2008). Na região esse tipo de derrame já foi descrito por outros autores (Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2014; 2018), e a morfologia observada corresponde com as litofácies identificadas neste trabalho. Além disso, é possível correlacionar estas lavas com a Fm. Vale do Sol (FVS), caracterizada por uma sequência de fluxos de lava com morfologia do tipo *rubbly pahoehoe*. Essa sequência pode ser muito bem observada no Perfil CKM, onde é possível identificar e inferir a presença de pelo menos 6 derrames com a mesma morfologia (Figura 11). A FVS no topo da sequência descrita apresenta uma intercalação com rochas ácidas da Fm. Palmas (FP), com contatos entre as formações próximo das cotas de 660 m e 500 m. Esse contato é evidenciado pelo contraste litológico das rochas ácidas com o topo brechado, formando pequenas grutas por erosão diferencial (Figura 18) (Haag *et al.*, 2016; Rossetti *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2018).

A associação de litofácies Das, Dbv e Dah foi interpretada como um sistema de alimentação de derrames ácidos, das quais as litofácies Das e Dbv estão diretamente associadas com os condutos; enquanto que a litofácies Dah está relacionada com o derrame laminar, localizado em partes mais afastadas do centro vulcânico. A litofácies Das possui uma estrutura subvertical bem marcada (Figura 19 – A, B) com dobras de fluxo (Figura 19 – C, D, E), e está relacionada com os condutos alimentadores das lavas ácidas da Fm. Palmas. Localmente, também estão presentes, autólitos com textura amigdalóide (Figura 15 – B) e subordinadamente com textura *jigsaw-fit* (Figura 19 – F), descritos como a litofácies Dbv. A presença de blocos vesiculados está relacionada à formação em condições de supersaturação de voláteis. Devido a alimentação constante do sistema, esses blocos vesiculados foram extraídos e estirados pelo fluxo (Fink, 1983; Lima *et al.*, 2012). A litofácies Dah está relacionada com condições de superfície, onde as lavas apresentam estruturas sub-horizontais, representando porções mais afastadas do centro vulcânico. Trabalhos regionais identificaram essas litofácies com essas estruturas subverticais e sub-horizontais características (Lima *et al.*, 2012; 2018; Simões *et al.*, 2018; Meucci *et al.*, 2021). Lima *et al.* (2012; 2018) basearam o

modelo de *emplacement* desses corpos ácidos, no modelo de Fink (1983) elaborado para derrames de obsidiana (Figura 20).

A associação de litofácies Dpm, Dvtp e Dv foi interpretada como relacionada a derrames tabulares dacíticos com terminações lobadas, a partir do modelo esquemático proposto por Rossetti *et al.* (2018) para a Fm. Palmas (Figura 5 – C). A litofácies Dpm é caracterizada pela textura porfirítica e uma estrutura maciça (sem estrutura de fluxo), assim como textura de desvitrificação, interpretada como o núcleo do derrame ácido; enquanto que a litofácies Dvtp possui uma textura vitrofírica e porfirítica característica, predominantemente maciça (localmente com textura de fluxo sub-horizontal), a matriz vítrea infere um rápido resfriamento da lava, possivelmente relacionada ao contato com o ar, sendo esta litofácies associada às porções mais externas do derrame. As terminações lobadas, representada pela litofácies Dv e observadas no ponto PM34, apresentam geometria de lobos, uma capa vitrofírica oxidada, vesículas estiradas que contornam as porções externas do derrame (Figura 21).

Durante o levantamento estratigráfico, foram identificados 4 diques de diabásio (Figura 22), com textura afanítica e disjunções colunares apertadas, possivelmente associados aos derrames básicos da porção superior da Fm. Vale do Sol. Os diques foram agrupados em 2 famílias de direções preferenciais, aproximadamente NNW-SSE e ENE-WSW.

A correlação entre as colunas e as associações de litofácies identificadas é apresentada na Figura 23, nela observam-se os perfis CM e CKM, para a melhor correspondência foram utilizados *datum* locais identificados em campo como: contato superior da Fm. Palmas (FP) com a Fm. Vale do Sol (FVS) estabelecido em aproximadamente 660 m, o vitrófiro porfirítico (Dvtp) e o topo da sequência de derrames *rubbly pahoehoe*. Em relação ao perfil CKM, afloram na base entre 4 a 5 derrames do tipo *rubbly pahoehoe*, com espessuras que variam entre 40 m a 25 m, e uma espessura média do pacote vulcânico da FVS com 175 m (na porção mais espessa) e 125m (na porção menos espessa). Na porção mediana dos perfis, afloram rochas ácidas da FP, interpretadas como derrames tabulares dacíticos, a espessura total dessa sequência de rochas, é estimada entre 100 m a 150 m. Nesta parte do perfil observa-se também a intercalação da FP com a FVS, marcada

novamente por derrames *rubbly pahoehoe*. No topo de toda a sequência, identificaram-se derrames ácidos laminares e tabulares.

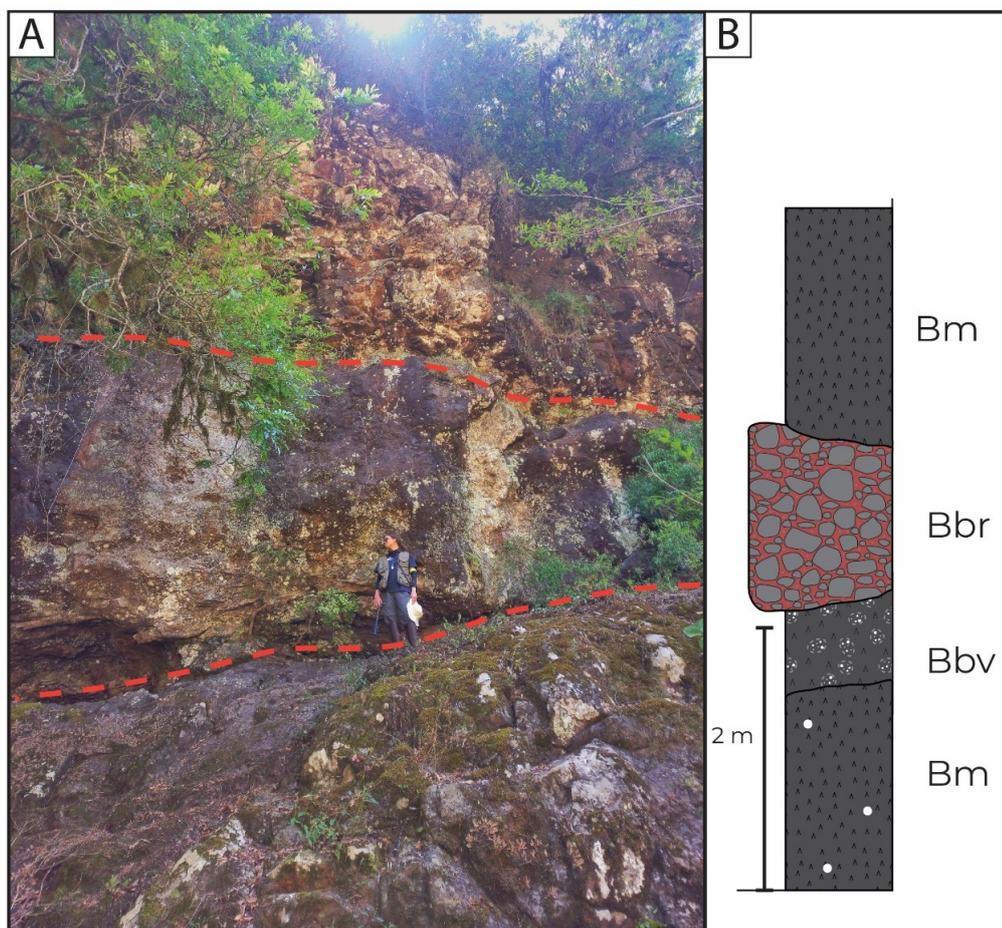


Figura 17 – A) Fotografia de um derrame básico do tipo *rubbly pahoehoe*, no ponto PM09 na Cachoeira da Mulada. B) Croqui esquemático do derrame. (Fonte: autor)



Figura 18 – Gruta formada por erosão diferencial, feição típica do contato da Fm. Vale do Sol com a Fm. Palmas. (Fonte: autor)

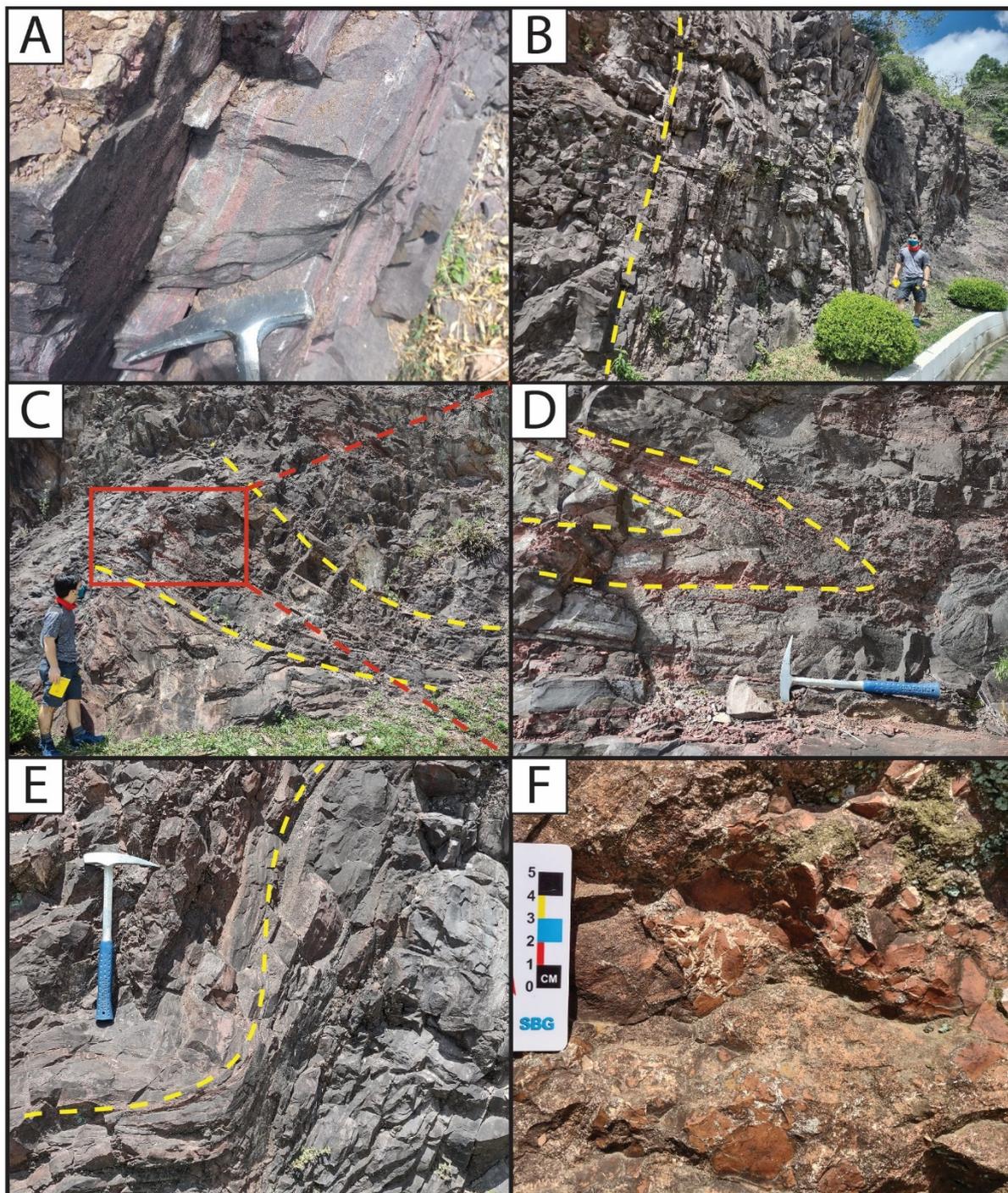


Figura 19 – Associação de litofácies dos sistemas de alimentação de derrames ácidos no ponto PM01 (condutos e derrames laminares). A) Detalhe das bandas cinzas e vermelhas. B) Estrutura de fluxo subvertical. C) Estruturas dobradas e sub-horizontais. D e E) Detalhe de dobras internas a foliação. F) Detalhe da litofácies com blocos vesiculados (Dbv), localmente com textura *jigsaw-fit*. (Fonte: autor)

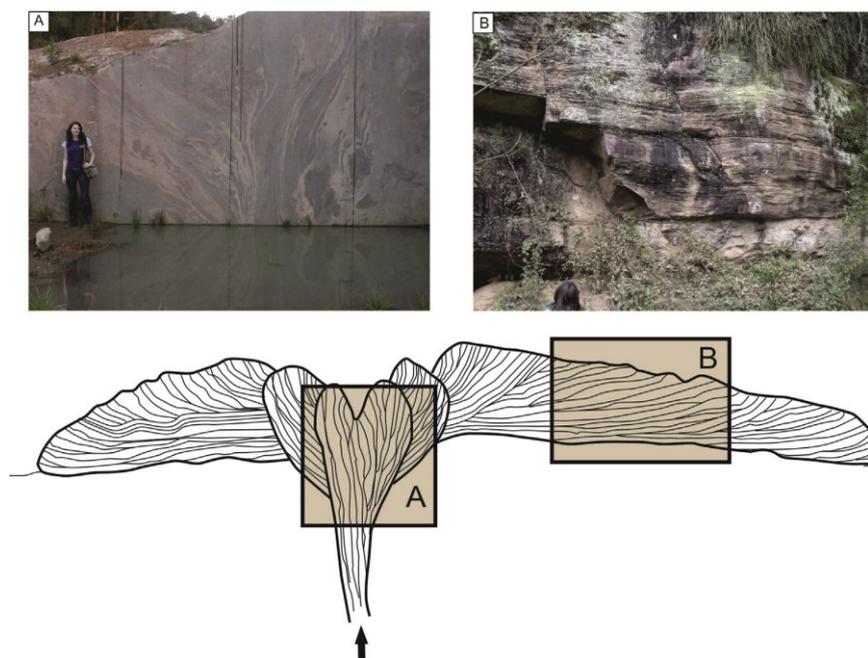


Figura 20 - Modelo de *emplacement* para os condutos e derrames laminares ácidos, baseado no modelo de Fink (1983) (Retirado de Lima *et al.*, 2018 – elaborado nas pedreiras da região de São Marcos).

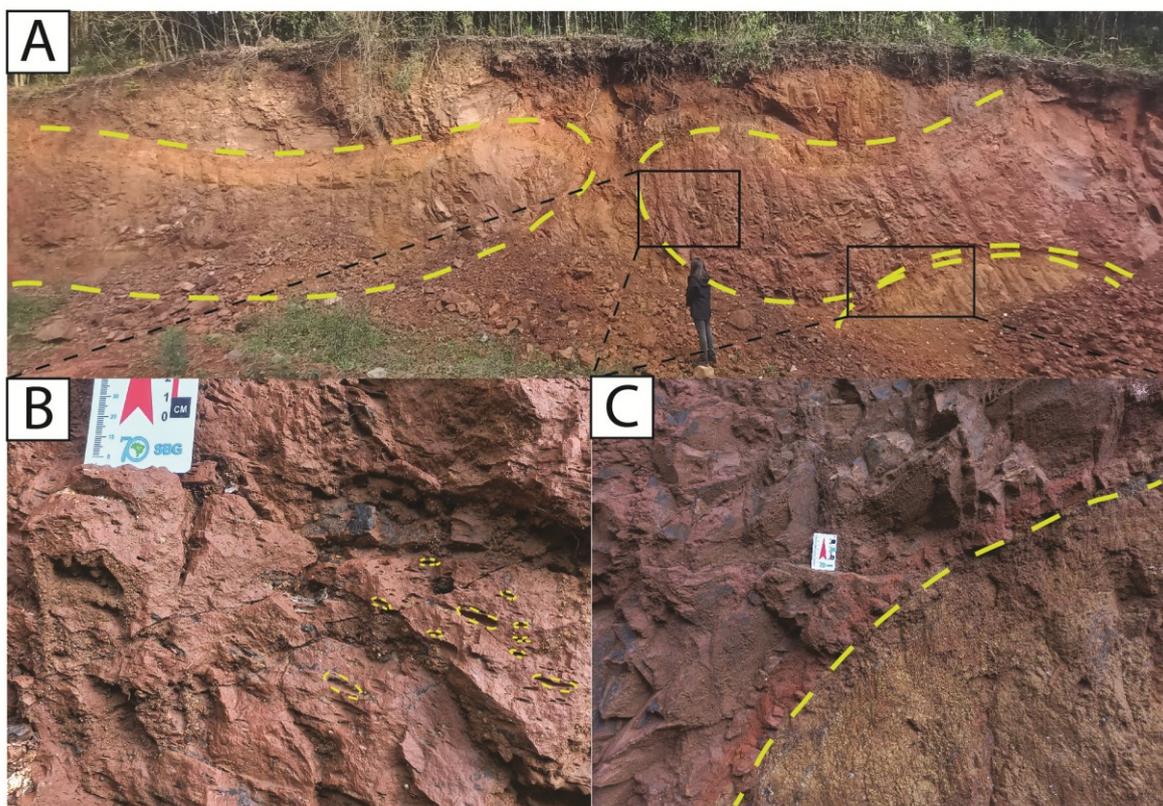


Figura 21 – A) Lobos ácidos identificados no ponto PM34. B) Detalhe das vesículas estiradas na borda do lobo. C) Detalhe da capa vitrofírica oxidada. (Fonte: autor)

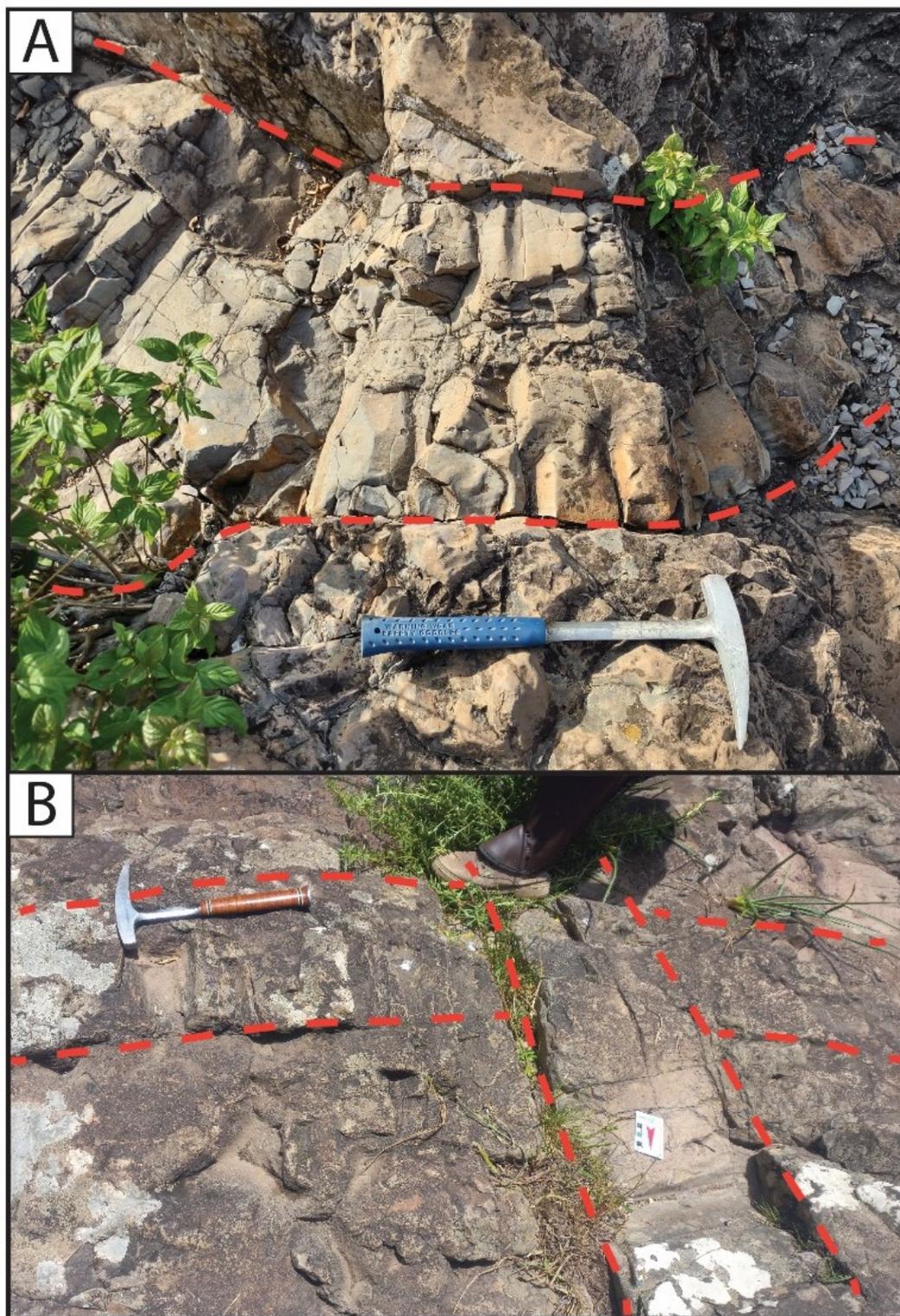


Figura 22 – A e B) Diques de diabásio, com textura afanítica e disjunções colunares. Estes são intrusivos nas litofácies Bm e Bbv de derrames tipo *rubbly pahoehoe*. (Fonte: autor)

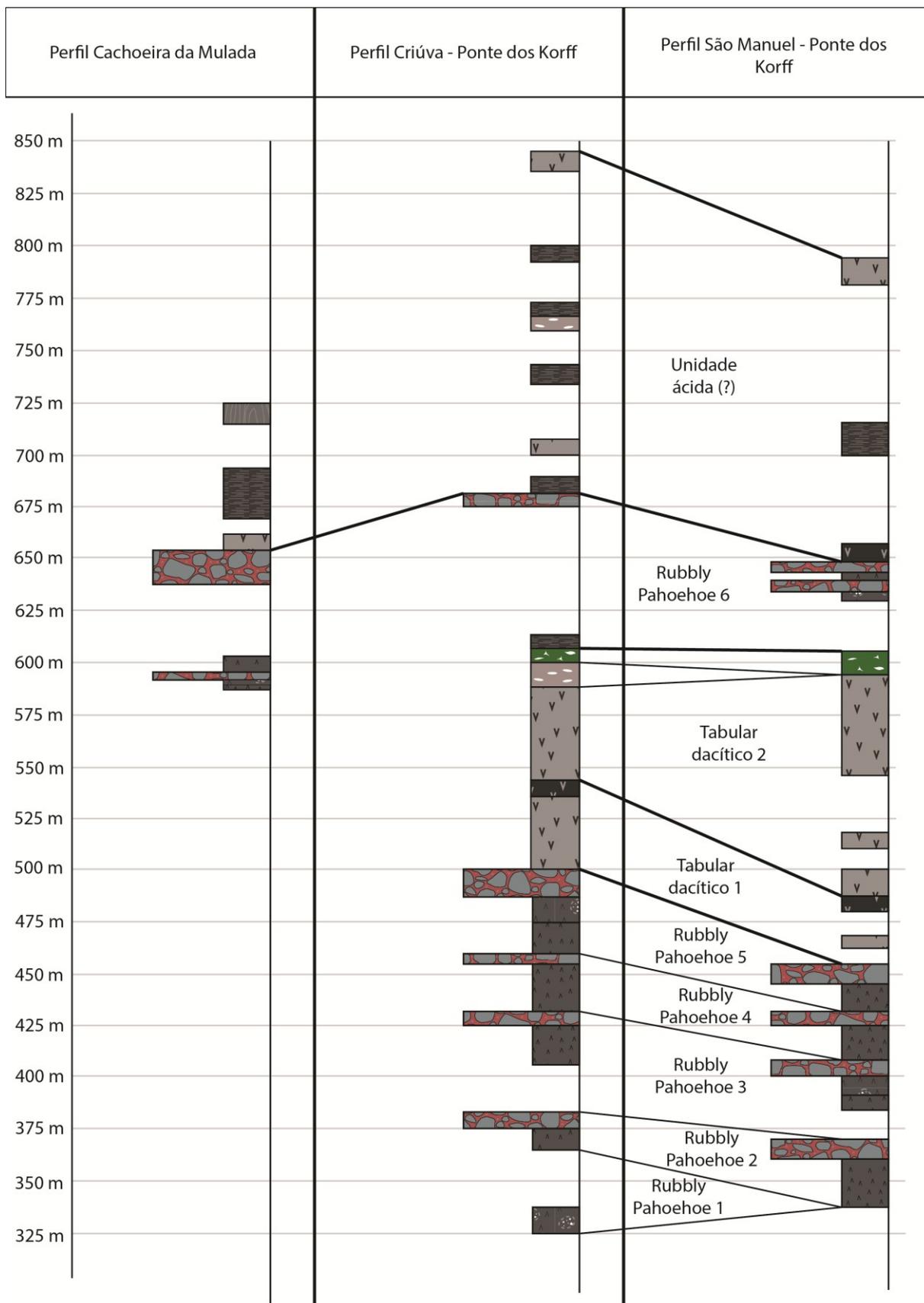


Figura 23 - Correlação das associações de litofácies identificados com os perfis realizados. (Fonte: autor)

4.2 Petrografia

A descrições petrográficas das amostras estão inseridas no APÊNDICE B.

4.2.1 Vulcânicas básicas

As litofácies básicas foram classificadas como basaltos com base na descrição petrográfica e na sua correlação com a Fm. Vale do Sol, onde essa composição domina. Texturalmente são rochas holocristalinas com textura afanítica a muito fina (Figura 24 – A, C, E) compostas por material vítreo alterado, com micrólitos de plagioclásio, piroxênio e opacos. A litofácies Bm apresenta uma textura cristalina fina (Figura 24 – F) em comparação às outras porções do derrame. Isto deve-se ao fato de ocorrência desta fácies no núcleo da lava, onde a perda de calor para a atmosfera/solo é menor, resultando em um grau de cristalinidade maior em relação às litofácies Bbr e Bbv (porções mais externas do derrame) (Figura 24 – B, D).

4.2.2 Vulcânicas ácidas

As litofácies ácidas foram classificadas como dacitos, apesar de que, petrograficamente, estas pudessem ser classificadas segundo o QAP como andesitos/basaltos, devido à grande quantidade de plagioclásio, e piroxênios de forma subordinada. O motivo dessa classificação deve-se aos trabalhos regionais, que apresentam descrições petrográficas similares e análise química, aferindo a Fm. Palmas uma composição dacítica para região e para as rochas mais próximas do contato com a Fm. Vale do Sol (Polo, 2014; Rossetti *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2018). Texturalmente são rochas holocristalinas com textura glomeroporfírica a porfírica, compostas por fenocristais de plagioclásio e subordinadamente piroxênio (Figura 25– A, B), imersos em uma matriz afanítica/muito fina composta por material vítreo alterado, desvitrificado ou com micrólitos de plagioclásio, piroxênio e opacos

(Figura 25 – C, D, E). Localmente, ocorre textura vitrofírica (Figura 25 – F) e também piroxênios prismáticos, nos quais foi possível diferenciar ortopiroxênio (enstatita?) (Figura 26 – A, B) e clinopiroxênio (augita?/pigeonita?) (Figura 26 – C). Alguns piroxênios apresentam textura de borda de reação (Figura 26 – D). Subordinadamente, foram observados plagioclásios com feições de reabsorção (textura em peneira) (Figura 26 – E, F). Em relação a estruturas, as litofácies Dah e Das apresentam uma de foliação de fluxo bem marcada pela diferença de cristalinidade (desvitrificação) e conteúdo de óxidos das bandas (Figura 25 – G, H).

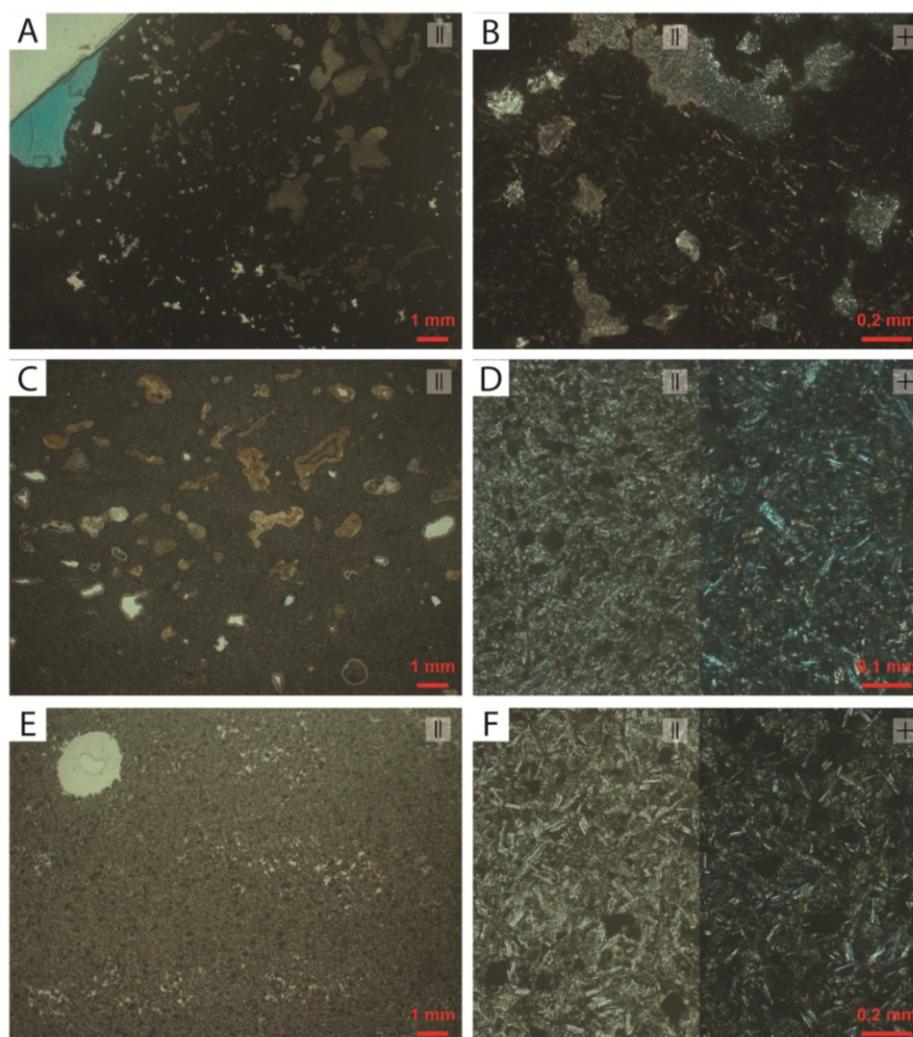


Figura 24 – Fotomicrografia das litofácies básicas. A e B) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bbr da textura afanítica e amigdalóide, com micrólitos de plagioclásio e piroxênio. C e D) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bbv da textura afanítica e amigdalóide, com cristais de plagioclásio, piroxênio e opacos. E e F) Aspecto geral e em detalhe da litofácies Bm da textura afanítica (mais grossa se comparado com as outras litofácies) e amigdalóide (menos presente), cristais de plagioclásio, piroxênio e opacos. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).(Fonte: autor)

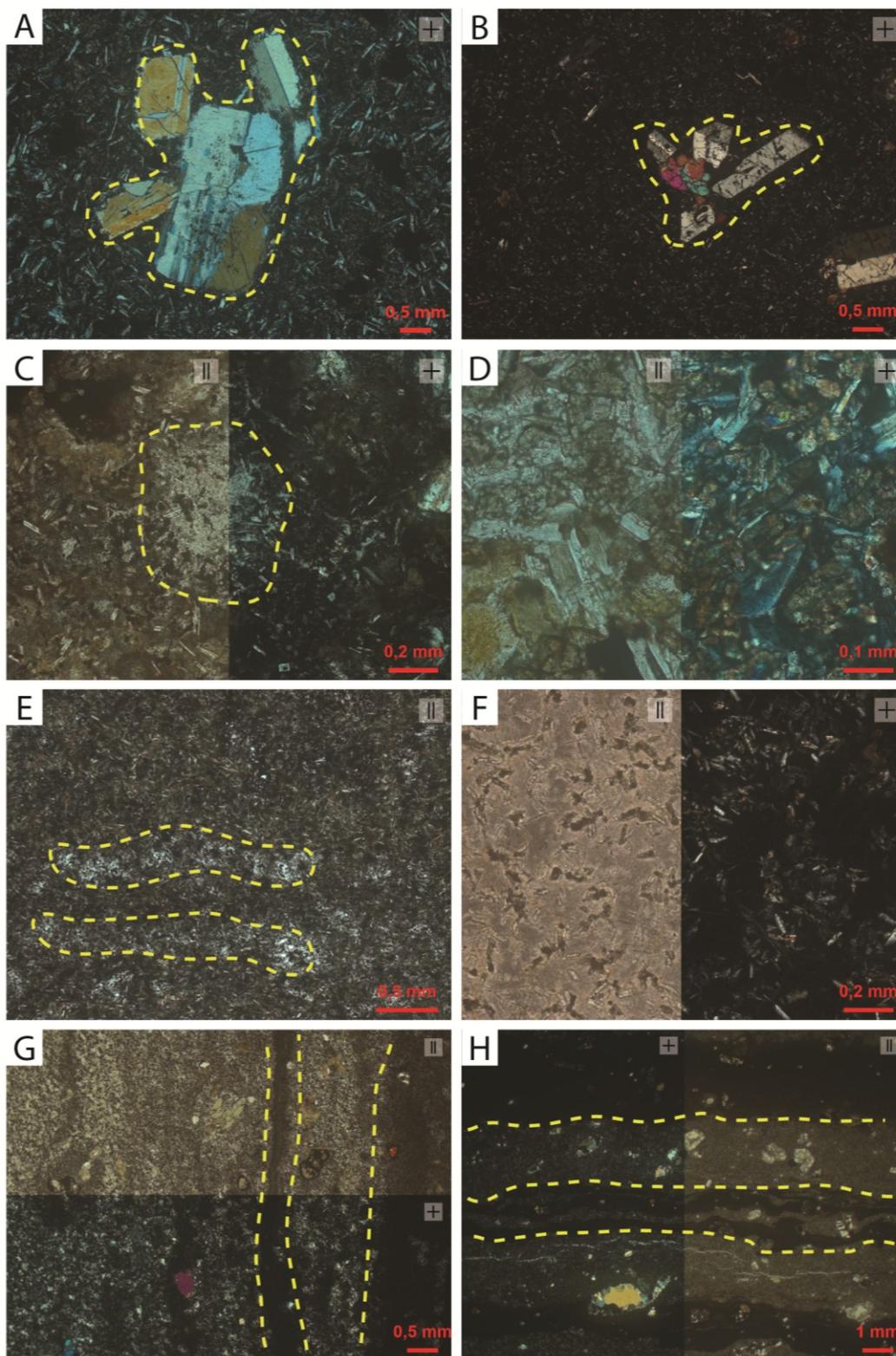


Figura 25 – Fotomicrografia das litofácies ácidas. A e B) Textura glomeroporfírica com fenocristais de plagioclásio e piroxênio. C) Detalhe da desvitrificação da matriz vítrea afanítica. D) Detalhe da matriz muito fina com cristais de plagioclásio e piroxênio. E) Textura afanítica com porções (mais claras) desvitrificadas. F) Textura vitrofírica com micrólitos de plagioclásio e piroxênio. G e H) Detalhe da foliação de fluxo nas litofácies Das e Dah, marcada por bandas desvitrificadas e oxidadas. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)

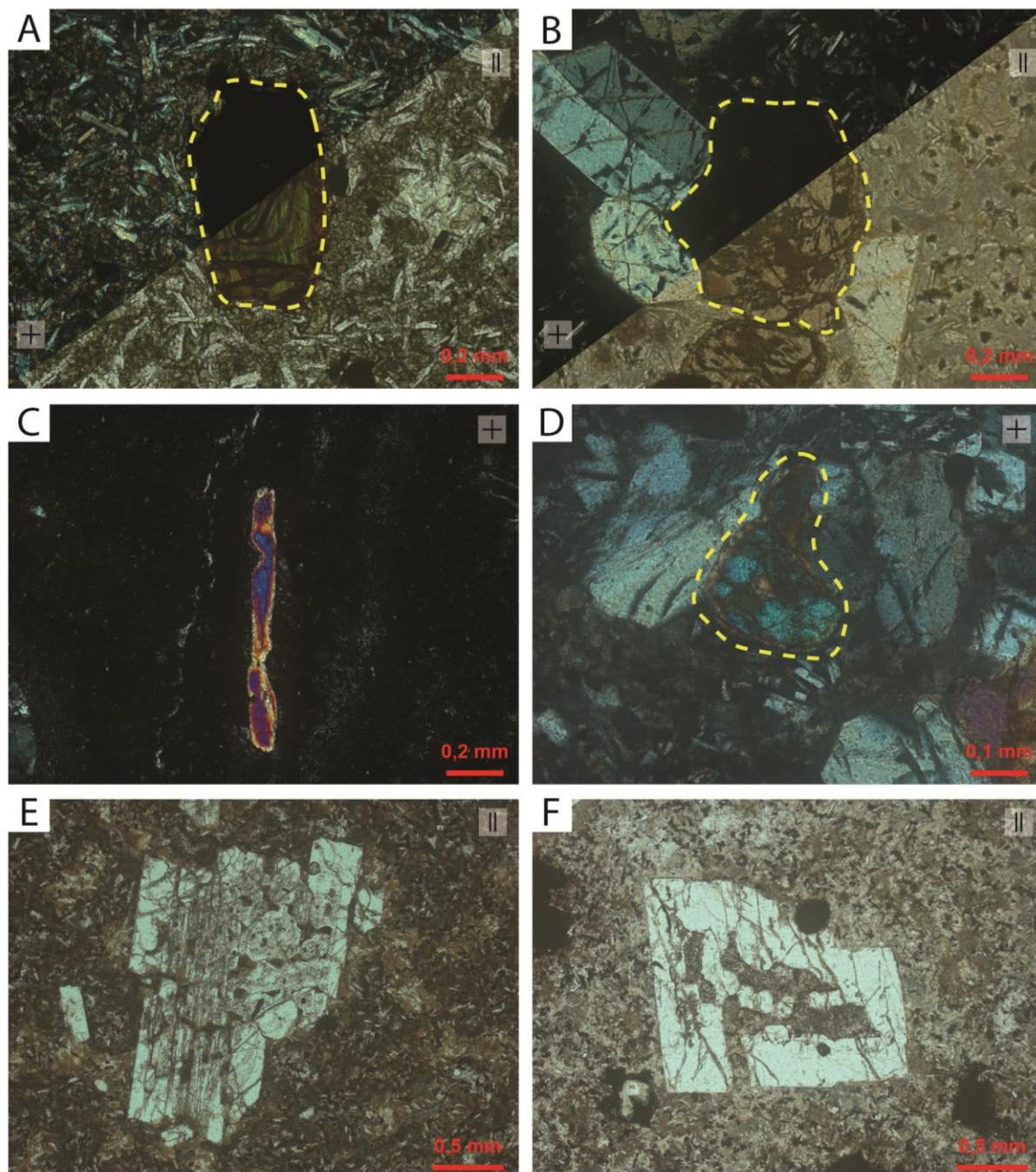


Figura 26 - Fotomicrografia da mineralogia e texturas identificadas nas litofácies ácidas. A e B) Cristal de ortopiroxênio (enstatita?). C) Cristal de clinopiroxênio (augita?/pigeonita?). D) Textura de borda de reação em piroxênio. E e F) Feições de reabsorção em plagioclásio (textura em peneira). Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)

4.3 Padrões de Porosidade

Neste subcapítulo serão apresentadas as descrições qualitativas e quantitativas dos padrões de porosidade, além de relacioná-las com as associações de litofácies.

4.3.1 Derrames básicos tipo *rubbly pahoehoe*

A porosidade nas litofácies Bbr, Bbv e Bm associadas ao tipo de derrame *rubbly pahoehoe* são baixas, estimadas em aproximadamente 0,5% – 4%, sendo a maior parte da porosidade obstruída pela precipitação de minerais secundários nas vesículas, como zeólita e quartzo. A porosidade presente nas rochas é primária do tipo vesicular (4%) (Figura 27A), e secundária do tipo *drusy* (1%) (Figura 27E) e de dissolução parcial intra-cristal de minerais primários (3%) (Figura 27F) e minerais secundários (0,5% – 1%) (Figura 27B, C e D). As amígdalas presentes nas litofácies Bbr e Bbv possuem forma pouco esférica a irregular e tamanho milimétrico (0,1 a 2 mm), e chegam a compor aproximadamente 18% da rocha total; enquanto que para a litofácies Bm as amígdalas são em menor quantidade (9,33%), porém em tamanhos maiores (2 a 6 mm) com forma esférica a irregular (textura diktitaxítica).

4.3.2 Sistemas de alimentação de derrames ácidos

A porosidade nas litofácies Das, Dbv e Dah associadas aos sistemas de alimentação de derrames ácidos são muito baixas (entre 0% – 0,6%), estas litofácies não geram condições de supersaturação de voláteis para a formação de grandes quantidades de vesículas, com exceção da Dbv, onde a maior parte da porosidade foi obstruída pela precipitação de minerais secundários (dominantemente zeólita). A porosidade presente nas rochas é secundária, do tipo dissolução parcial intra-cristal de minerais primários (0,2 – 0,6%) (Figura 28A e B). As amígdalas presentes nas litofácies Das e Dah possuem forma esférica a oval e tamanho milimétrico (0,1 a 2

mm) (Figura 28C e D), e chegam a compor aproximadamente 0,33% (Dah) e 1% a 2,33% (Das) da rocha total; enquanto que para a litofácies Dbv as amígdalas são em maior quantidade (17%), em tamanhos variados (0,4 a 2,5 mm) com forma esférica a irregular. Localmente ocorrem fraturas também preenchidas por zeólita e quartzo.

4.3.3 Derrames tabulares dacíticos

A porosidade nas litofácies Dpm e Dvtp associadas aos derrames tabulares dacíticos são muito baixas, estimadas em aproximadamente 0% – 0,13%. A baixa taxa de vesiculação dessas lavas e a obstrução posterior por minerais secundários impedem valores altos de porosidade. A porosidade presente nas rochas é secundária, do tipo *drusy* (0,05 – 0,13%) (Figura 28E) e restrita a litofácies Dpm, e as amígdalas presentes possuem forma oval a irregular (textura diktitaxítica) com tamanho milimétrico (1 a 3,2 mm), compondo aproximadamente entre 3 a 9% da rocha total; enquanto que para a litofácies Dvtp as amígdalas são em menor quantidade (1,33%), em tamanhos variados (0,4 a 2,4 mm) com forma esférica (Figura 28F). Localmente, ocorrem fraturas também preenchidas por zeólita e quartzo.

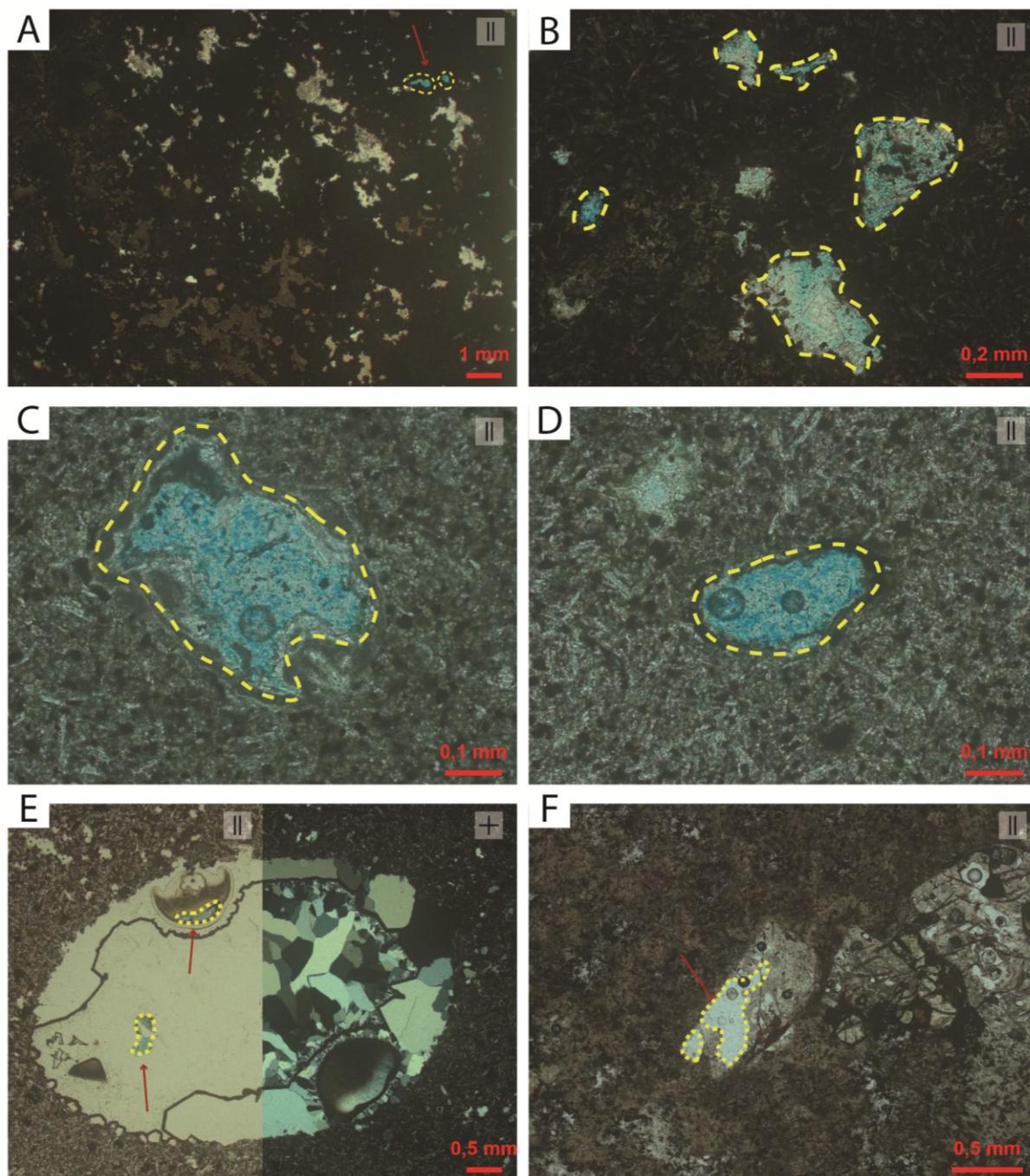


Figura 27 - Fotomicrografia da porosidade nas litofácies básicas. A) Porosidade primária do tipo vesicular (seta vermelha) (Bbr). B) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais secundários) (Bbr). C e D) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais secundários em amígdalas) (Bbv). E) Porosidade secundária do tipo *drusy* (em amígdala – setas vermelhas) (Bm). F) Porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais primários) (Bm). Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).(Fonte: autor)

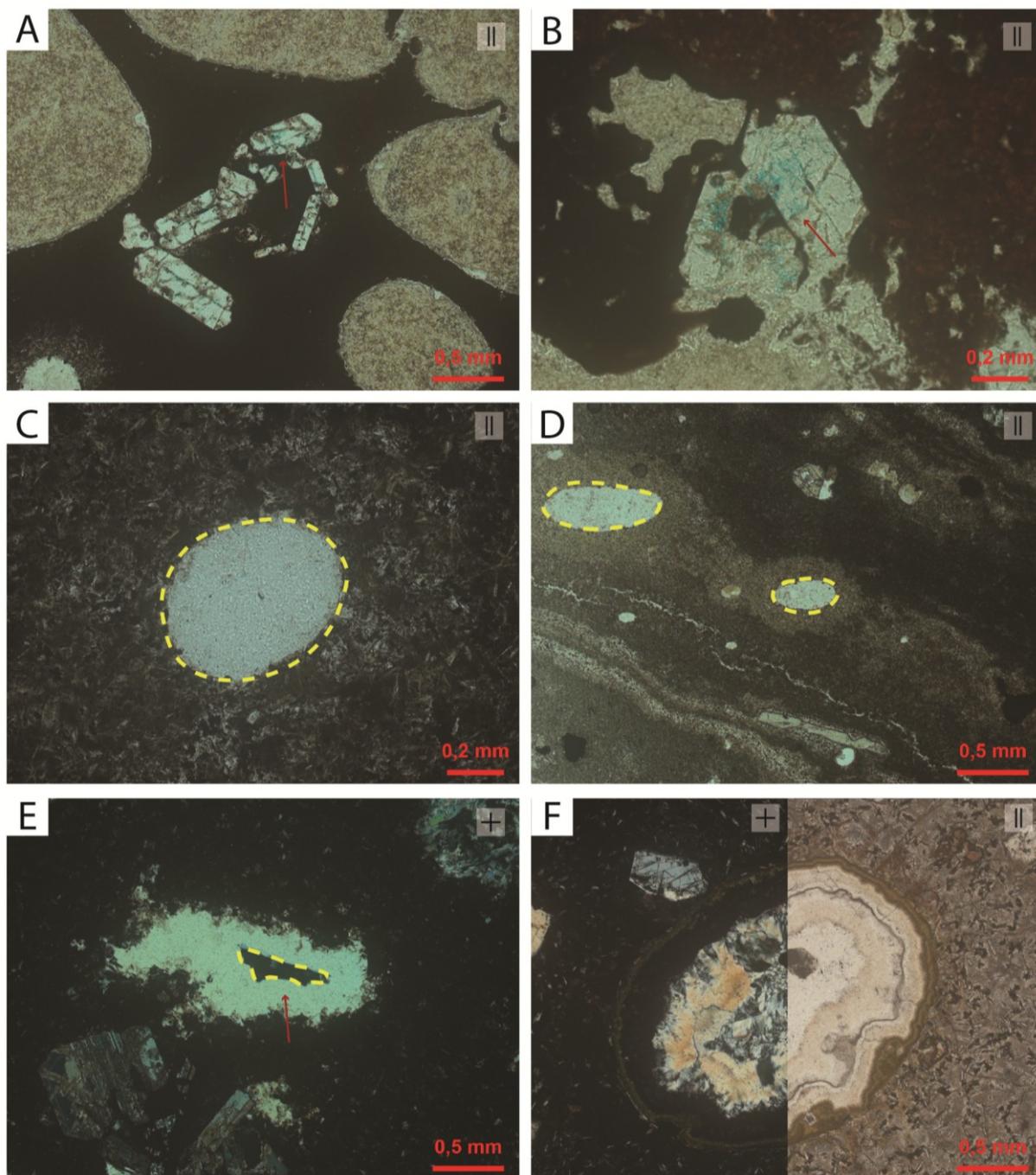


Figura 28 - Fotomicrografia da porosidade nas litofácies ácidas. A e B) Amígdalas e porosidade secundária do tipo intra-cristal (a partir da dissolução parcial de minerais primários – setas vermelhas). (Dbv). C e D) Amígdalas esféricas e ovais na litofácies Das e Dah. E) Porosidade secundária do tipo *drusy* (em amígdala – seta vermelha) (Dpm). F) Amígdala esférica e oval na litofácies Dvtp, preenchida por celadonita (?), zeólita e calcedônia. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor)

4.3.4 Integração dos dados

Em resumo (Quadro 4), a porosidade das associações vulcânicas analisadas é baixa, chegando a valores máximos de 5% para porosidade primária em basaltos brechados e 4% para porosidade secundária em basaltos maciços. Nas litofácies, a porosidade secundária é dominante, representada pelos tipos intra-cristal (dissolução parcial de minerais primários e secundários) e do tipo *drusy* (precipitação parcial de minerais secundários em vesículas); enquanto que a porosidade primária é subordinada, representada pelo tipo vesicular (liberação de voláteis). Devido a processos de precipitação de minerais secundários, os poros originais foram majoritariamente obstruídos, nas litofácies vesiculadas e brechadas (Bbr, Bbv e Dbv) os valores poderiam chegar próximos de 17% – 18%. Para as outras litofácies esses valores seriam menores em torno de 1% – 3%, chegando até 8%.

De acordo com Hyne (2012) esses valores de porosidade de até 5%, se encaixam na qualidade insignificante para reservatórios de óleo, porém, se considerar uma rocha vulcânica (brechada ou vesiculada) com valores entre 15% a 20% de porosidade, onde a precipitação de minerais secundários não ocorreu, poderia ser enquadrado em um reservatório de qualidade boa. É possível inferir também que devido à baixa porosidade dessas rochas, elas possam servir como rochas capeadoras, permitindo a acumulação de hidrocarbonetos, em caso de uma situação estratigráfica/estrutural favorável.

Quadro 4 - Resumo dos padrões de porosidade identificados nas litofácies e associações. (Fonte: autor)

Assoc. de litofácies	Litofácies	Tipo de porosidade	Porosidade
<i>Rubbly pahoehoe</i>	Bbr	Porosidade 1 ^a : vesicular	4%
		Porosidade 2 ^a : dissolução parcial intra-cristal de minerais secundários (em amígdala)	1%
	Bbv	Porosidade 2 ^a : dissolução parcial intra-cristal de minerais secundários (em amígdala)	0,50%
	Bm	Porosidade 2 ^a : tipo <i>drusy</i>	1%
		Porosidade 2 ^a : dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	3%
Sistemas de alimentação de derrames ácidos	Das	Porosidade 2 ^a : dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0% a 0,6%
	Dbv	Porosidade 2 ^a : dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0,20%
	Dah	-	0%
Derrames tabulares dacíticos	Dpm	Porosidade 2 ^a : tipo <i>drusy</i>	0% a 0,13%
	Dvtp	-	0%

5 CONCLUSÃO

- O estudo estratigráfico da região da Cachoeira da Mulada, em Criúva (RS), permitiu a identificação de 10 litofácies, 3 de composição básica e 7 de composição ácida, interpretadas em 3 associações. Basaltos brechados (Bbr), com blocos vesiculados (Bbv) e maciços (Bm), são interpretadas como derrames do tipo *rubbly pahoehoe* e correlacionadas a Fm. Vale do Sol. Dacitos afaníticos subverticais (Das) e com blocos vesiculados (Dbv) estão relacionadas a condutos de alimentação de derrames ácidos laminares, estes derrames sendo representados por dacitos afaníticos sub-horizontais (Dah). Por fim, dacitos porfíricos maciços (Dpm), dacitos vesiculados (Dv) e dacitos vitrofíricos porfíricos (Dvtp), representam derrames tabulares dacíticos com terminações lobadas. A litofácies Dvtv foi preliminarmente descrita como um dacito vitrofírico vesiculado. As litofácies ácidas estão correlacionadas com a Fm. Palmas.
- O mapeamento litoestratigráfico e petrográfico, inédito na região de Criúva, permite a correlação com áreas adjacentes (como São Marcos e Mato Perso), melhorando a compreensão do *emplacement* das rochas vulcânicas do Gr. Serra Geral.
- Petrograficamente, as litofácies básicas possuem textura afanítica a muito fina composta por vidro alterado e micrólitos de plagioclásio e piroxênio. As litofácies ácidas apresentam textura glomeroporfírica a porfírica imerso em uma matriz afanítica a muito fina, com porções desvitrificadas e localmente vitrofírica (Dvtp). Os fenocristais são compostos predominantemente por plagioclásios e subordinadamente orto e clinopiroxênios. Em relação as estruturas subverticais e sub-horizontais, estas são marcadas pela foliação de fluxo, por bandas com diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação.
- A análise da porosidade das rochas permitiu relacionar os tipos de poros com as litofácies identificadas nos derrames. Aumentando o detalhamento da região para esse tipo de estudo petrofísico, principalmente para a Fm. Palmas, onde os dados são mais escassos.
- Após a análise dos tipos de porosidade encontradas nas litofácies, constata-se que a porosidade dominante é do tipo secundária, representada

principalmente pelo tipo intra-cristal, (dissolução parcial de minerais primários e secundários), e tipo *drusy* (precipitação parcial de minerais secundários em vesículas). A porosidade primária ocorre, porém de modo subordinado na forma de vesículas.

- As vulcânicas básicas apresentaram no geral valores maiores de porosidade, chegando a 4 a 5% para as litofácies Bm e Bbr, e 0,5% para a Bbv. Já as vulcânicas ácidas apresentaram valores muito baixos, variando entre 0 a 0,6% para a litofácies Das, e valores mais baixos para as outras entre 0% e 0,2%.
- A porosidade original foi intensamente afetada pela precipitação de minerais secundários formando amígdalas. No caso das litofácies brechadas e vesiculadas (Bbr, Bbv e Dbv), a porosidade poderia ter valores altos, de aproximadamente 17%. Já para as outras litofácies, que apresentam um grau de vesiculação mais baixo, poderiam chegar a valores próximos de 8% (Bm e Dpm) e entre 1 e 2% (Dvtp, Das e Dah).
- Com base em Hyne (2012), os valores de porosidade apresentados por essas litofácies, de até 5%, se encaixam em uma qualidade insignificante para reservatório.
- Com o objetivo de refinar os dados sobre os padrões petrofísicos das rochas da região, trabalhos futuros devem, além de coletar mais dados de campo, analisar as litofácies com o auxílio de um porosímetro-permeâmetro e microtomografia computadorizada de raios-X para avaliar quantitativamente a porosidade e permeabilidade dessas rochas, assim como correlacionar com eletrofácies.
- Os resultados obtidos, como a construção do arcabouço estratigráfico, petrografia e análise dos padrões de porosidade, servem de base para a geração de modelos análogos para reservatórios não-convencionais vulcânicos, além de auxiliarem no estudo de bacias vulcanossedimentares *offshore*, onde a aquisição de dados é complexa.

REFERÊNCIAS

Aubele, J.C., Crumpler, I.S. & Elston, W.E. 1988. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35: 349-374.

Baksi, A.K. 2017. Paraná flood basalt volcanism primarily limited to ~ 1 Myr beginning at 135 Ma: New 40 Ar/39 Ar ages for rocks from Rio Grande do Sul, and critical evaluation of published radiometric data. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.02.016>.

Barreto, C.J.S. 2016. *Associação de fácies, padrões de vesiculação e petrologia dos derrames básicos da Formação Serra Geral na ombreira sul da Calha de Torres (RS)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR.

Barreto, C.J.S., Lima, E.F., Goldberg, K., 2017. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from Paraná igneous province, southern Brazil. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 79, Pages 31. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1116-x>.

Becker, M. 2017. *Caracterização e quantificação do sistema poroso em rochas básicas e ácidas do Grupo Serra Geral*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Becker, M., Lima, E.F., Waichel, B.L., Mantovani, I.F. 2019. Pore system quantification and characterization in volcanic rocks: a case study from the lower cretaceous Serra Geral group, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 42(3), Pages 301-318. <https://doi.org/10.1111/jpg.12735>

Bellieni, G., Brotzu, P., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, M., Melfi, A., Pacca, I.G., Piccirillo, E.M. 1984. Flood basalt to rhyolite suites in the Southern Parana Plateau

(Brazil): palaeomagnetism, petrogenesis and geodynamic implications. *J. Petrol.* 25 (3), 579–618

Bryan S.E. & Ernst, R.E. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs). *Earth Sci. Rev.* 86, 175e202.

Cas, R.A.F. & Wright J.V. 1987. *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. 522 pp. Allen & Unwin, London.

Chang, H.K., Assine, M.L., Corrêa, F.S., Tinen, J.S., Vidal, A.C., Koike, L. 2008. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geociências*, Vol. 38 (2).

Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1992. Volcanism and continental break-up: a global compilation of large igneous provinces. In: *Geological Society of London Special Publication*, vol. 68, pp. 17e30.

Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1994 Large Igneous Provinces: crustal structure, dimensions and external consequences. *Rev. Geophys.* 32:1–36. <https://doi.org/10.1029/93RG02508>

Couves, C., Roberts, S., Racey, A., Troth, I., Best, A. 2016. Use of X-Ray computed tomography to quantify the petrophysical properties of volcanic rocks: a case study from Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 39(1), Pages 79-94.

Cruz, V.G.P. 2019. *Rochas siliciclásticas e vulcanoclásticas associadas do Grupo Serra Geral na Calha de Torres (RS)*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Dodd, S.C., Mac, Niocaill, C., Muxworthy, A.R. 2015. Long duration (> 4 Ma) and steady- state volcanic activity in the early Cretaceous Paraná–Etendeka Large

Igneous Province: New palaeomagnetic data from Namibia. *Earth Planet. Sci. Lett.* 414, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.009>.

Duraiswami, R.A., Bondre, N.R., Managave, S. 2008. Morphology of *rubblly pahoehoe* (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: implications for style of emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 822–836.

Duraiswami, R.A., Gadpallu, P., Shaikh, T.N. & Cardin, N. 2014. Pahoehoe–a'a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. *Journal Asian Earth Science*, 84, 146–166.

Farooqui, M.Y., Hou, H., Li G., Machin, N., Neville T., Pal A., Shrivastva C., Wang Y., Yang F., Yin C., Zhao J., Yang X. 2009. *Evaluating Volcanic Reservoirs*. Oilfield Review.

Fisher, R.V. 1961. Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. *Geol Soc Am Bull* 72: 1409-1414.

Fisher, R.V. & Schmincke H.U. 1984. *Pyroclastic Rocks*. 472 pp. Springer-Verlag, Berlin

Fink, J.H. 1983. Structure and emplacement of a rhyolitic obsidian flow: Little Glass Mountain, Medicine Lake Highland, northern California. *Geological Society of America Bulletin*. Volume 94, Pages 362-380

Frank, H.T., Gomes, M.E.B. and Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, 36 (1), 49–57.

Haag, M., Abreu, E., Silva, F., Morais, G., Marin, H., Caron, F., Sobiesiak, J., Souza, M., Betella, C., Frank, H. 2016. Densidade regional das cavernas basais em Riolitos da Fm. Serra Geral (Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul, Brasil. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Vol. 1, pg. 1323.

HYNE, N. J. 2012. *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production*. PennWell Books.

Janasi, V.D.A., de Freitas, V.A., Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U–Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó- type dacite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 302, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.005>.

Jerram, D. a., Widdowson, M. 2005. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79, 385–405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.009>.

Keszthelyi, L., Thordarson, T. 2000. *Rubbly pahoehoe*: a previously undescribed but widespread lava type transitional between aa and pahoehoe. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs* 32, 7.

Lenhardt, N., Götz, A.E. 2011. Volcanic settings and their reservoir potencial: An outcrop analog study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 204, 2011, Pages 66-75, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.007>.

Lima, E.F., Philipp, R.P., Rizzon, G.C., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M. 2012. Sucessões Vulcânicas e Modelo de Alimentação e Geração de Domos de Lava Ácidos da Formação Serra Geral na Região de São Marcos, Antonio Prado (RS). *Geol. Usp. Ser. Cient.* 12, 49e64.

Lima, E.F., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M., Sommer, C.A., Simões, M.S. 2018. Feeder systems of acidic lava flows from the Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil and their implications for eruption style. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 81, 2018, Pages 1-9, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.004>.

Liu, J., Wang, P., Zhang, Y., Bian, W., Huang, Y., Tang, H., Chen, X. 2012. *Volcanic Rock-Hosted Natural Hydrocarbon Resources: A Review. Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic Systems.* Chapter 4. <http://dx.doi.org/10.5772/54587>

Macdonald, G.A. 1953. Pahoehoe, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251:169-191.

Mantovani, M.S.M., Stewart, K., Turner, S. & Hawkesworth, C.J. 1995. Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and sources regions of continental flood basalts. In: Symposium on the Physics and the Chemistry of the upper Mantle, 1995., São Paulo. *Proceedings. Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67 (Suplemento 2): 163-170.

Martí, J., Mitjavila, J., Araña, V. 1994. Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands). *Geol. Mag.* 131, 715–727.

Martí, J., Gropelli, G., Silveira, A.B. 2018. Volcanic stratigraphy: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 357, 2018, Pages 68-91, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.006>.

McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993. *Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks.* Centre for Ore Deposit and Exploration Studies. University of Tasmania.

Meucci, M.C., Pasqualon, N.G., Lima E.F. 2021. Estratigrafia do Cânion Palanquinho, Caxias do Sul, RS. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Geologia, Vol. 2, pg. 770.

Miall, A. D. 1977 *Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary.*

Mizusaki, A.M.P. 1986. *Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos – caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos.* Rio de

Janeiro, 104p. Mestrado em Geociências, Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Moreira, J.L.P., Esteves, C.A., Rodrigues, J.J.G., Vasconcelos, C. 2006. Magmatismo, sedimentação e estratigrafia de porção norte da Bacia Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro. Vol. 14. 161-170.

Pasqualon, N.G. 2017. *Estratigrafia, petrologia e padrões de porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão, Ilha da Trindade, Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Pasqualon, N.G., de Lima, E.F., dos Santos Scherer, C.M., Rossetti, L.D.M.M., da Luz, F.R. 2019. Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão Volcano, Trindade Is- land, Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 380, 48–63.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139. <https://doi.org/10.1007/BF00301125>

Peate, D. 1997. The Paraná-Etendeka Province. Large Igneous Prov. Cont. Ocean. Planet. Flood Volcanism, 100, pp. 217-245

Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic Flood Volcanism from the Paraná Basin (Brazil): Petrogenetic and Geophysical Aspects. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Polo, L.A. 2014. *O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka na região de Gramado Xavier, RS: estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia. Instituto de Geociências. São Paulo, SP.

Reis, S.G., Mizusaki, A.M., Roisenberg, A., Rubert, R.R. 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da bacia do Paraná): um análogo para reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em geociências*, Vol. 41 (2), Páginas 155-168.

Renne, P., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M. & Perrin, M. 1992. The age of Paraná Flood Volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, 258:975-979.

Riccomini, C., Sant'Anna, L.G., Tassinari, C.C.G. 2012. Pré-sal: Geologia e Exploração. *Revista USP*, São Paulo, N° 95, Páginas 33-42.

Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Scherer, C.M., Barreto, C.J. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. S. Am. Earth Sci.*, 56, pp. 409-421, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.025>

Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., Scherer, C.M.S. 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra geral group, parana-etendeka igneous province in southern Brazil: towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 355, 2018, Pages 98-114, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>.

Rossetti, M.L., Healy, D., Hole, M.J., Millett, J.M., Lima, E.F., Jerram, D.A., Rossetti, M.M. 2019. Evaluating petrophysical properties of volcano-sedimentary sequences: A case study in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 102, 2019, Pages 638-656, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.028>.

Schutter, S.R. 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. *Geological Society*, London, Special Publications, 2003, Vol. 214, Pages 7-33, doi: 10.1144/GSL.SP2003.214.01.02

Self S., Thordarson T., Keszthelyi L. 1997. Emplacement of continental flood basalt lava flows. In: Mahoney J.J., Coffin M. (eds) Large igneous provinces, *Geophysical Monograph* series N° 100, AGU, Washington DC, pp 381–410

Simões M.S., Lima E.F., Sommer C.A., Rossetti L.M.M. 2018. Structures and lithofacies of inferred silicic conduits in the Paraná-Etendeka LIP, southernmost Brazil, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 355, Pages 319-336, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.12.013>.

Sruoga, P., Rubinstein, N., Hinterwimmer, G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 132, Issue 1, 2004, Pages 31-43, ISSN 0377-0273, [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00419-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00419-0).

Sruoga, P., Rubinstein, N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bull.*, 91 (1), 115-129.

Thiede, D., Vasconcelos, P. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar results. *Geology* 747–750. <https://doi.org/10.1130/G30919.1>.

Waichel, B.L., de Lima, E.F., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G. 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 215–216, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004>.

Wang Pujon, Chen Chongyang, Zhang Ying, Gao Youfeng, Qu Xuejiao, Yi Jian, 2015. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 2, 440-448.

Zou, C., Guangya, Z., Rukai, Z., Xuanjun, Y., Xia, Z., Lianhua, H., Baihong, W., Xiaozhi, W. 2013. *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*. Elsevier

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela com as informações dos pontos, coordenadas, cota de altitude, amostra e lâmina delgada.

Ponto	Coordenada (mE)	Coordenada (mN)	Cota (m)	Amostra	Lâmina
PM01	0492700	6777753	735	M01,M02, M03	Sim
PM02	0506129	6806690	692	-	-
PM03	0506152	6806781	717	-	-
PM04	0506119	6806826	720	M04	-
PM05	0505884	6806747	680	M05	-
PM06	0505844	6806808	692	M06	Sim
PM07	0505703	6806797	671	M07	Sim
PM08	0505675	6806810	659	M08A, M08B	-
PM09	0505654	6806785	590	M09A, M09B, M09C	Sim
PM10	0505722	6806723	600	M10-D1, M10-D2	-
PM11	0501638	6806035	839	M11	-
PM12	0500795	6808542	695	M12	-
PM13	0500683	6808913	681	M13	-
PM14	0500092	6810658	585	M14A, M14B	Sim
PM15	0499281	6810467	459	-	-
PM16	0499284	6811039	348	M16A, M16B	-
PM17	0500276	6810289	609	-	-
PM18	0500289	6810318	606	-	-
PM19	0500284	6810529	599	M19	-
PM20	0500043	6810774	586	M20	-
PM21	0499912	6810853	570	M21	Sim
PM22	0499844	6811057	555	M22	Sim
PM23	0499659	6810794	521	M23	-
PM24	0499501	6810655	502	M24	Sim
PM25	0499467	6810655	499	M25A, M25B	-
PM26	0499252	6810704	425	-	-
PM27	0499423	6810967	396	-	-
PM28	0500085	6813786	663	-	-
PM29	0500041	6813578	645	-	-

PM30	0500154	6813233	608	M30	-
PM31	0499943	6812614	558	-	-
PM32	0499256	6811135	360	M32	-
PM33	0501782	6807072	802	M33	-
PM34	0500989	6807389	765	M34	-
PM35	0500784	6808783	688	-	-
PM36	0500145	6809408	682	-	-
PM37	0499574	6811147	373	-	-
PM38	0499416	6811366	380	-	-
PM39	0499515	6811702	425	-	-
PM40	0499674	6812068	464	M40	-
PM41	0499691	6812184	490	M41	-
PM42	0499821	6812420	517	M42	-
PM43	0499533	6813937	705	-	-
PM44	0498559	6815544	782	-	-
PM45	0500578	6807824	737	-	-
PM46	0500280	6808296	706	M46	-
PM47	0499841	6812595	561	-	-
PM48	0499748	6812582.	578	-	-

APÊNDICE B

Descrições de campo e petrográficas:

PM01

0492700 mE

6777753 mN

Cota: 735 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Das/Dbv

Descrição de campo: O afloramento tem 5 setores distribuídos lateralmente (croqui nas fotos):

Setor 1: Rocha ácida maciça de cor avermelhada com brechas (lembra “shlieren”).

Setor 2: Rocha ácida afanítica de cor avermelhada foliada com dobras apertadas.

Setor 3: Rocha ácida maciça de cor avermelhada com brechas (lembra “shlieren”).

Setor 4: Rocha ácida subvertical de cor cinza (dominante) com vermelho concordante

Setor 5: Rocha ácida maciça de cor avermelhada com brechas (lembra “shlieren”).

OBS: os setores 1, 3 e 5 são similares/iguais.

Atitudes: a = 82/125; b = 80/350; c = 24,066 (charneira)

Descrição petrográfica:

M01: Rocha vulcânica porfírica com fenocristais de plagioclásio euédricos (0,4 a 0,8 mm, predominando entre 0,4 mm), ortopiroxênio e clinopiroxênio subédricos (0,3 a 0,6 mm, predominando entre 0,3 mm) e opacos anédricos (0,15 mm a 0,4 mm). Matriz é composta vidro alterado e oxidado com porções desvitrificadas. A rocha apresenta uma foliação de fluxo subvertical milimétrica bem marcada por bandas (0,4 a 8 mm) com diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação (conteúdo de óxidos). Textura amigdalóide ocorre, porém rara, composta por amígdalas com formato esférico a levemente oval desde 0,1 mm até 1,6 mm (predominando tamanho 0,3 mm), as amígdalas são preenchidas por zeólitas. Ocorre também a presença de fraturas paralelas a foliação, com espessura de 0,4 mm preenchidas por zeólita. Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

4,67% Plagioclásio, fenocristal;

5,33% Piroxênio, fenocristal;

2,33% Opacos, fenocristal;

81,33% Matriz, afanítica;

1% Amígdalas, esféricas a levemente oval.

1,67% Fraturas.

Porosidade: 0%

Classificação: Dacito afanítico com foliação subvertical

M02: Rocha vulcânica com blocos vesiculados imersa em uma matriz vulcânica coerente afanítica vítrea muito oxidada. Localmente ocorre textura *jig-saw fit* com blocos angulosos e cimentados por zeólita. Ocorrem plagioclásios com dissolução parcial (0,3 a 0,8 mm) ressaltando uma porosidade intracristalina e piroxênios (0,2 a 0,4 mm). Textura amigdalóide bem presente com o predomínio de formas esféricas e subordinadamente com formatos irregulares, mas arredondadas (0,4 mm a 2,5 mm) preenchidas por zeólita (?) e argilominerais. Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

4,47% Plagioclásio, fenocristal;

1,33% Piroxênio, fenocristal;

55,33% Matriz, vítrea oxidada;

21,67% Cimentação interclastos;

17% Amígdalas, esféricas a irregulares;

~0,2% Porosidade em plagioclásio com dissolução parcial.

Porosidade: ~0,2%

Classificação: Dacito com blocos vesiculados

M03: Rocha vulcânica porfirítica com fenocristais de plagioclásio euédrico (0,15 a 0,8 mm, predominando entre 0,5 mm) e piroxênio subédrico bem alterado (0,3 a 0,6 mm, predominando entre 0,3 mm). Matriz é composta vidro alterado e oxidado com porções desvitrificadas. A rocha apresenta uma foliação de fluxo subvertical milimétrica bem marcada por bandas (0,4 a 6 mm) com diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação (conteúdo de óxidos). Textura amigdalóide ocorre, porém rara, composta por amígdalas com formato oval desde 0,4 mm até 2 mm, as amígdalas são preenchidas por quartzo e zeólita. Ocorre também a presença de fraturas paralelas a foliação, com espessura de 0,2 mm preenchidas por quartzo. Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

7,37% Plagioclásio, fenocristal;

8,03% Piroxênio, fenocristal;

2,67% Opacos, fenocristal;

77% Matriz, afanítica;

2,33% Amígdalas, oval;

2% Fraturas.

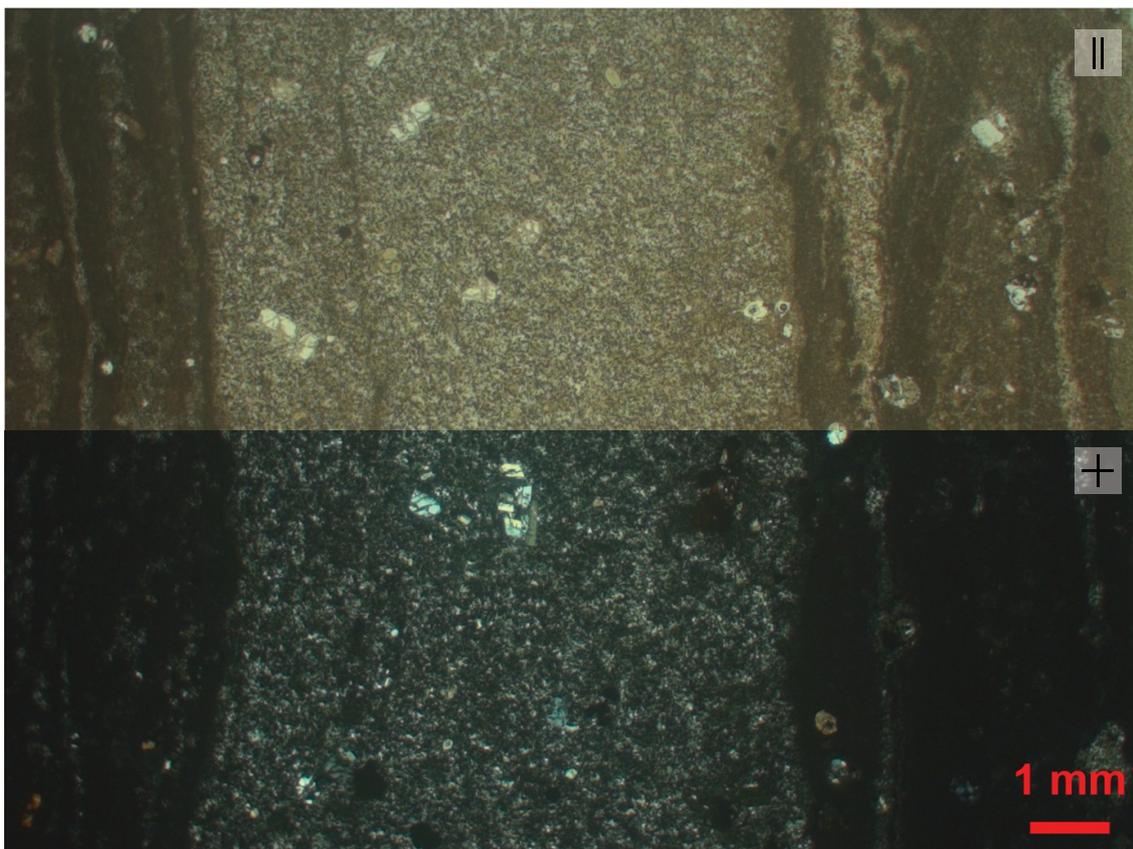
~0,6% Porosidade em plagioclásio/piroxênio com dissolução parcial.

Porosidade: ~0,6%

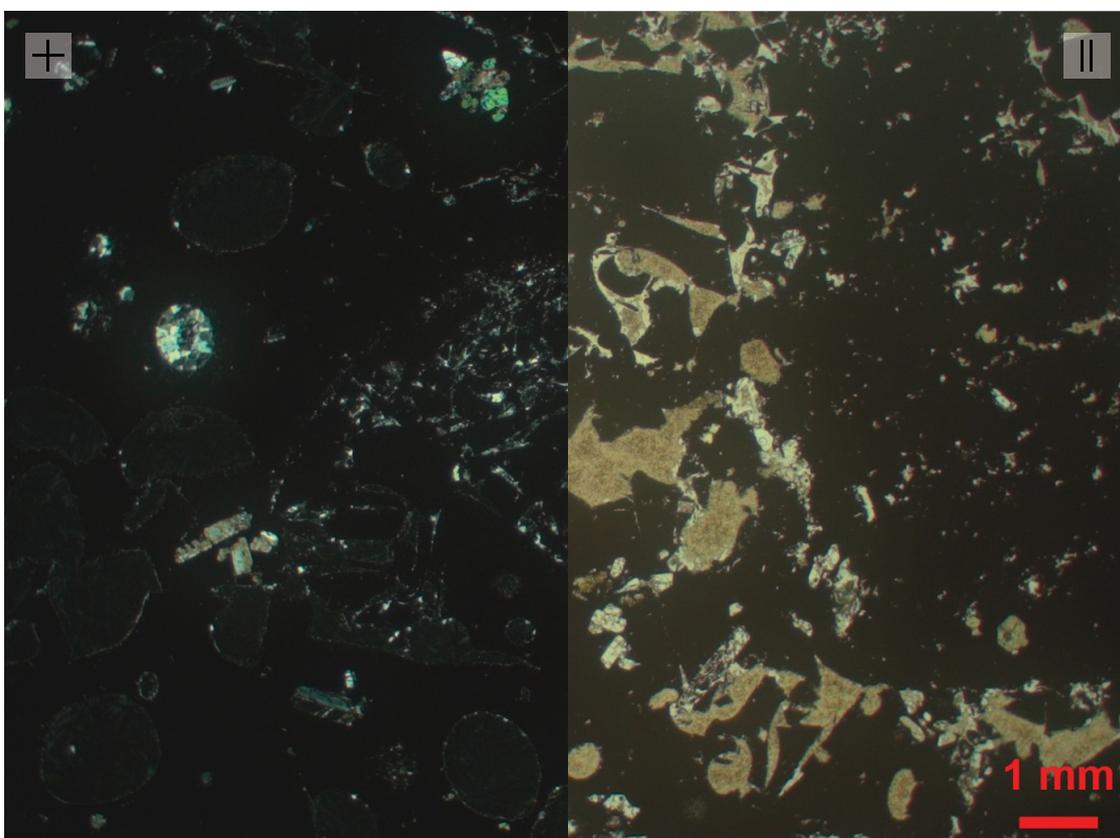
Classificação: Dacito afanítico com foliação subvertical

Amostra: M01 (Setor 4), M02 (Setor 3) e M03 (Setor 2)

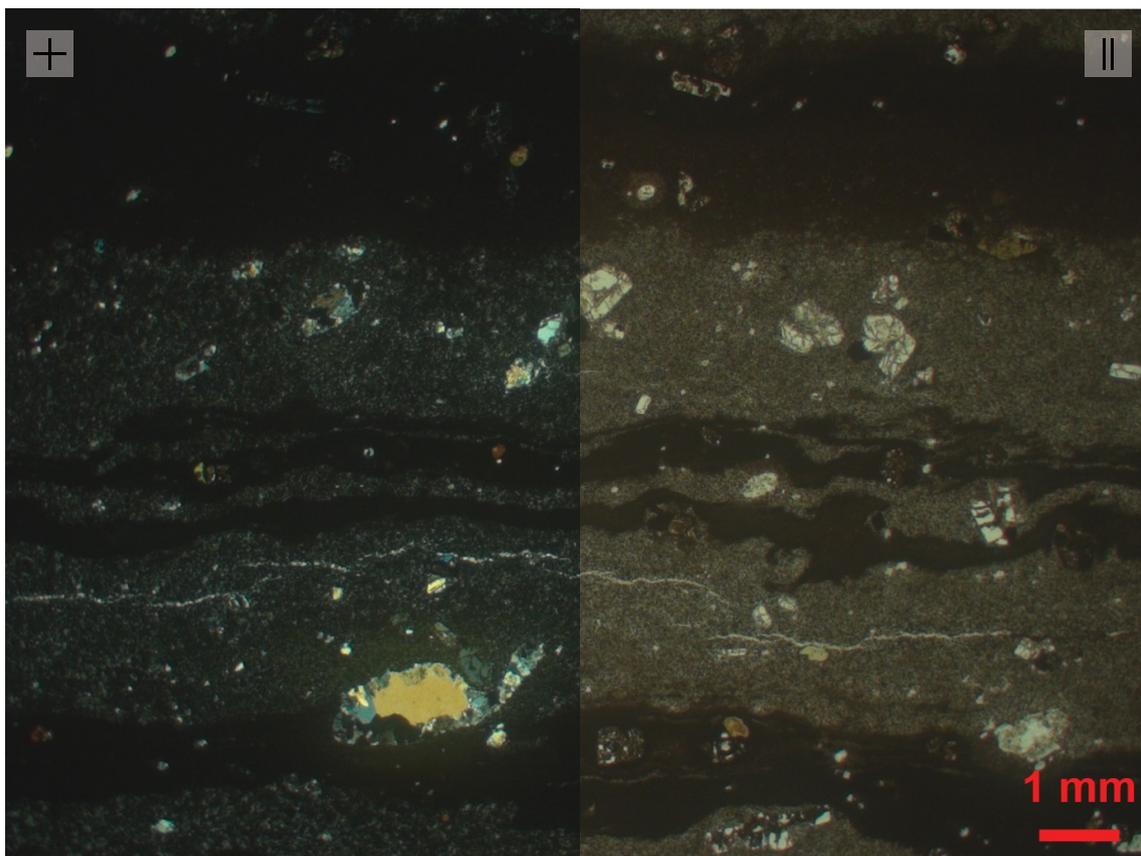
Fotos:



Visão geral da rocha da lâmina M1. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).



Visão geral da rocha da lâmina M2. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).



Visão geral da rocha da lâmina M3. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM02

0506129 mE

6806690 mN

Cota: 692 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Rocha ácida cor “chocolate” maciça com foliação bem marcada horizontal. Sem vesículas.

Classificação: Dacito afanítico com foliação sub-horizontal

Amostra: -

PM03

0506152 mE

6806781 mN

Cota: 717 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Das

Descrição de campo: Rocha ácida afanítica com foliação subvertical e pequenas vesículas, com cor avermelhada. Apresenta dobras na qual aparente haver uma interação entre as cores cinza e vermelho. No mesmo afloramento em cota inferior (715 m) existe um contato reto e nítido com a rocha ácida cinza maciça e desvitrificada.

Classificação: Dacito afanítico com foliação subvertical

Amostra: -

PM04

0506119 mE

6806826 mN

Cota: 720 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Das

Descrição de campo: Rocha ácida subvertical, apresenta intercalações cinza-vermelho. Contém vesículas grandes e arredondadas.

Classificação: Dacito afanítico com foliação subvertical

Amostra: M04

PM05

0505884 mE

6806747 mN

Cota: 680 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Rocha ácida avermelhada com orientação subhorizontal, com vesículas centimétricas esféricas a alongadas.

Classificação: Dacito afanítico com foliação sub-horizontal

Amostra: M05

PM06

0505844 mE

6806808 mN

Cota: 692 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Rocha ácida subhorizontal (centimétricas), cor “chocolate”, fanerítico fino a afanítico, afírico.

Descrição petrográfica:

M06: Rocha vulcânica afanítica microcristalina com vidro alterado, oxidado e desvitrificado com cristais de plagioclásio ripiforme (<0,06 mm). A rocha apresenta uma foliação de fluxo sub-horizontal milimétrica marcada pela diferença de cristalinidade (desvitrificação) e oxidação (conteúdo de óxidos). Textura amigdalóide ocorre, porém rara, amígdalas esféricas preenchidas por zeólita (0,24 a 0,6 mm). Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

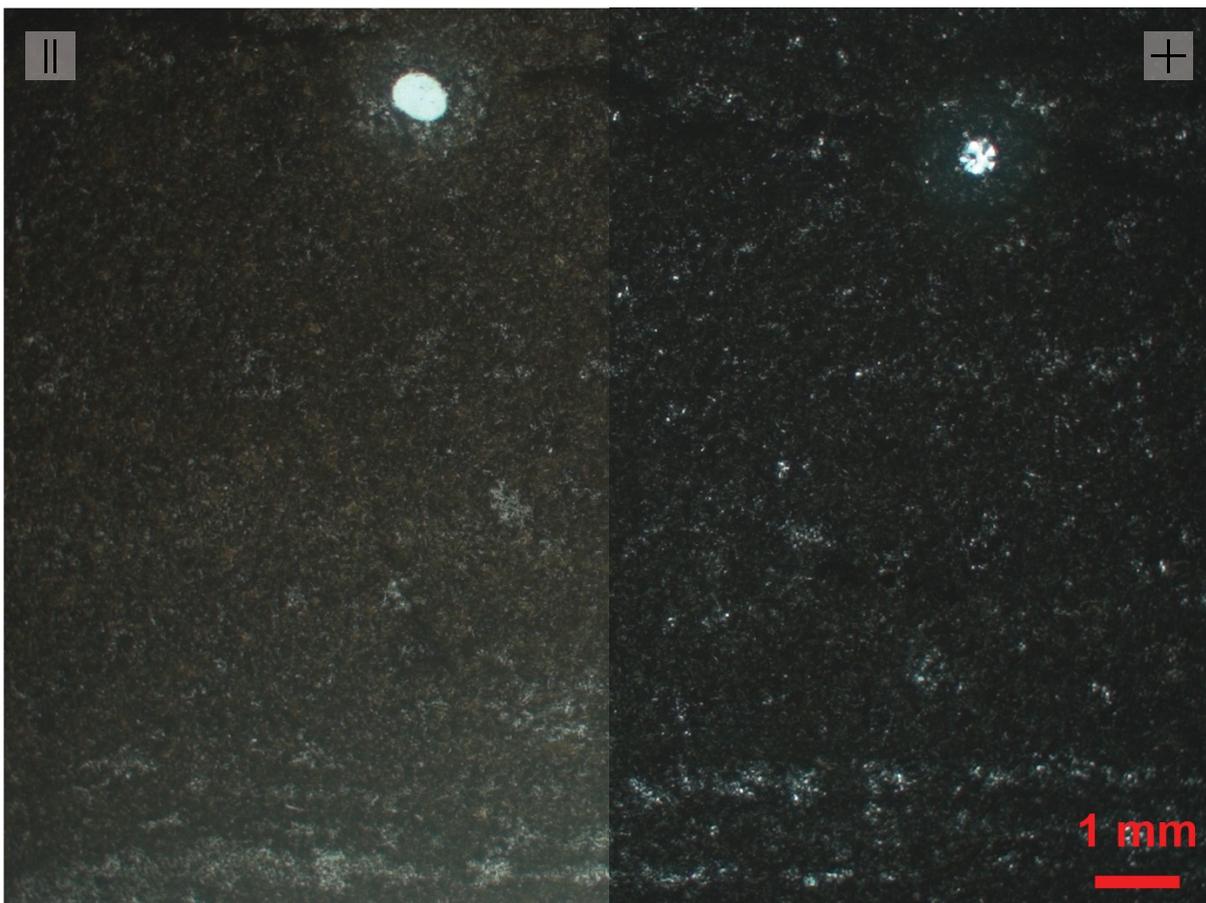
99,67% Textura afanítica; micrólitos de plagioclásio;

0,33% Amígdalas, esféricas.

Porosidade: 0%

Classificação: Dacito afanítico com foliação sub-horizontal

Amostra: M06



Visão geral da rocha da lâmina M06. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM07

0505703 mE

6806797 mN

Cota: 671 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Rocha ácida subhorizontal de cor cinza, fanerítica fina a afanítica. Raras amígdalas milimétricas.

Descrição petrográfica:

M07: Rocha vulcânica porfírica com fenocristais de plagioclásio euédrico (0,8 a 1,6 mm) e ortopiroxênio alterado euédrico (0,8 mm). Matriz é fanerítica fina, composta por plagioclásio euédrico (0,2 a 0,4 mm), piroxênio subédrico a euédrico (0,06 mm) e opacos anédricos (0,1 a 0,2 mm). Textura intersticial ocorre de forma subordinada representada desvitrificação (?) e zeólita. Rocha aparenta ser um dacito (com base

no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

1% Plagioclásio, fenocristal;

0,33% Piroxênio, fenocristal;

38,67% Matriz, plagioclásio;

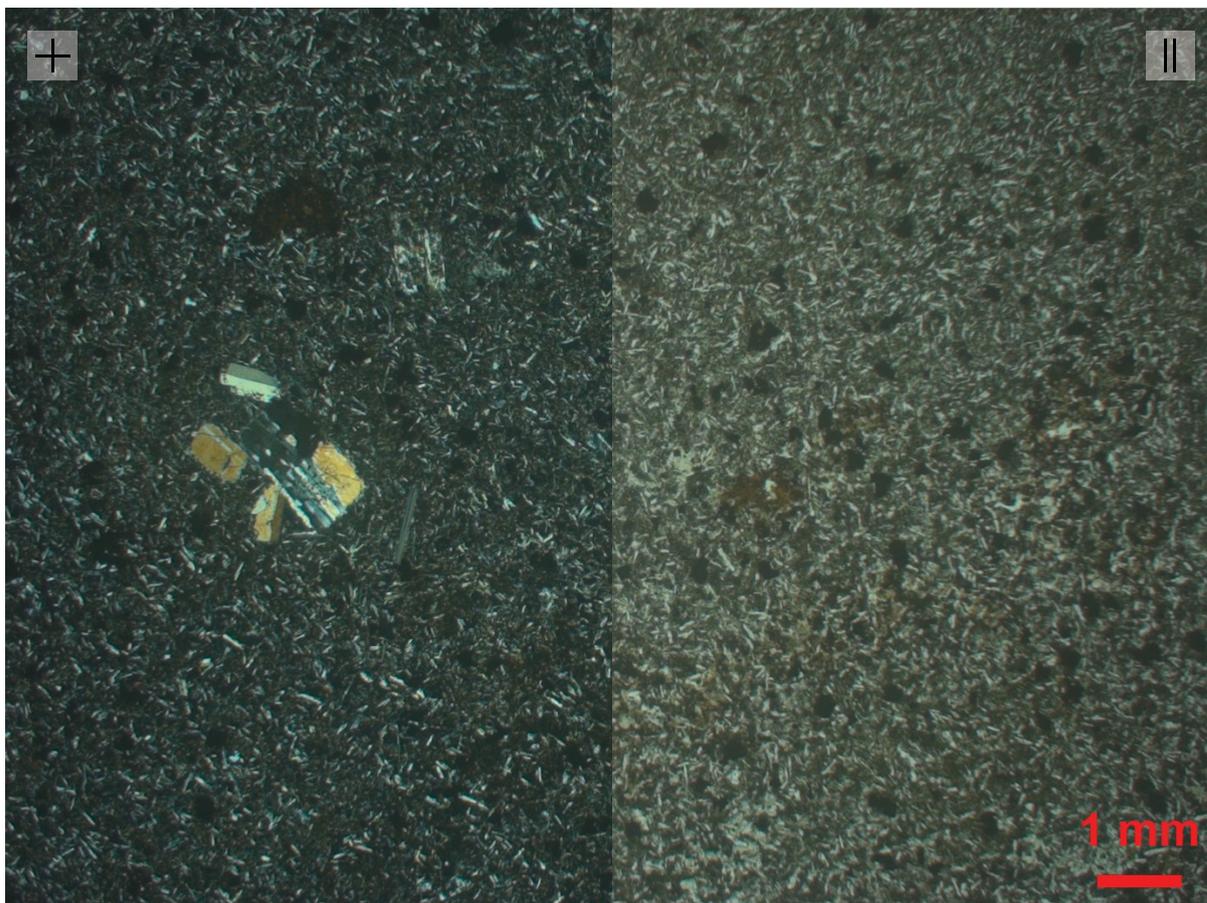
42,33% Matriz, piroxênio;

11,33% Matriz, desvitrificação.

Porosidade: 0%

Classificação: Dacito afanítico com foliação sub-horizontal

Amostra: M07



Visão geral da rocha da lâmina M07. Nicóis paralelos (||) e Nicóis perpendiculares (+).

PM08

0505675 mE

6806810 mN

Cota: 659 m

Unidade: Fm. Palmas/Fm. Vale do Sol

Litofácies: Dpm/Bbr

Descrição de campo: Contato de uma rocha básica brechada do tipo rubbly (porção inferior) com uma rocha maciça (porção superior) (ácida? Ou base maciça da rubbly?). A brecha tem blocos vesiculados (milimétricas) e não vesiculados maciços de cor avermelhada, preenchidas principalmente por zeólitas. O contato ocorre em 659 m (505675 mE / 6806810 mN).

Classificação: Dacito afanítico maciço/Basalto brechado

Amostra: M08A (maciça) e M08B (brecha)

PM09

0505654 mE

6806785 mN

Cota: 590 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr/Bbv/Bm

Descrição de campo: Neste ponto foi contruído um perfil colunar de 11,75 m. Na base (0 – 2,25 m) é constituída por um basalto maciço (Bm), de cor cinza esparsamente microvesiculado. Na porção intermediária (2,25 – 3 m) é constituída por um basalto cinza composto por blocos vesiculados (“autólitos”). No pacote sobreposto (3 – 6,50 m), é constituído por um basalto brechado (zona de brechas) de cor avermelhada, oxidada com vesículas e amígdalas. O pacote superior (6,50 – 11,75m) não foi possível acessar e a sua espessura foi estimada, porém é bem visível um contato da zona de brecha com uma porção do núcleo de uma rubbly? Possivelmente se tratam de 2 derrames basálticos do tipo rubbly.

Descrição petrográfica:

M09A: Rocha vulcânica afanítica microcristalina composta por material vítreo alterado e cristais pequenos (<0,06 mm) de plagioclásio ripiforme, piroxênio e opacos anédricos. Amígdalas são muito presentes com formato pouco esférico a irregulares, possuem tamanho de 0,1 a 1,6 mm (predominando tamanho de 0,6 mm) e são preenchidas por um material criptocristalino de cor verde (esmectita?) e em seguida zeólita, localmente com textura radial. Algumas amígdalas apresentam

porosidade intracristalina nos minerais secundários. Rocha aparenta ser um andesito/basalto.

Composição:

80% Textura afanítica alterada com micrólitos de plagioclásio e piroxênio;

1,33% Opacos, anédricos;

17,67% Amígdalas, pouco esféricas a irregulares;

~0,5% Porosidade em amígdala com dissolução parcial.

Porosidade: ~0,5%

Classificação: Basalto com blocos vesiculados.

M09B: Rocha vulcânica brechada imersa em uma matriz vulcânica coerente afanítica microcristalina composta por micrólitos de plagioclásio. Fragmentos com textura afanítica e textura amigdalóide e vesicular (subordinada) Porosidade interclasto (autobrecha) totalmente preenchidas por argilas e zeólita.

Composição:

76,67% Textura afanítica alterada com micrólitos de plagioclásio;

18,33% Amígdalas, pouco esféricas a irregulares;

1% Porosidade em zeólita (?) dissolvida;

4% Porosidade vesicular.

Porosidade: 5%

Classificação: Basalto brechado.

M09C: Rocha vulcânica fanerítica fina com plagioclásio euédrico a subédrico (0,1 a 0,2 mm), piroxênio anédrico (0,05 mm) e opacos anédricos (0,01 mm). Amígdalas são raras, mas grandes em relação a textura da rocha (6 a 2 mm), com formato esférico a irregulares (textura diktitaxítica), são preenchidas por quartzo e zeólita. Rocha aparenta ser um andesito/basalto.

Composição:

38,67% Plagioclásio, euédrico a subédrico;

40,67% Piroxênio, anédrico;

5,33% Opacos, anédrico

5% Material vítreo, alterado;

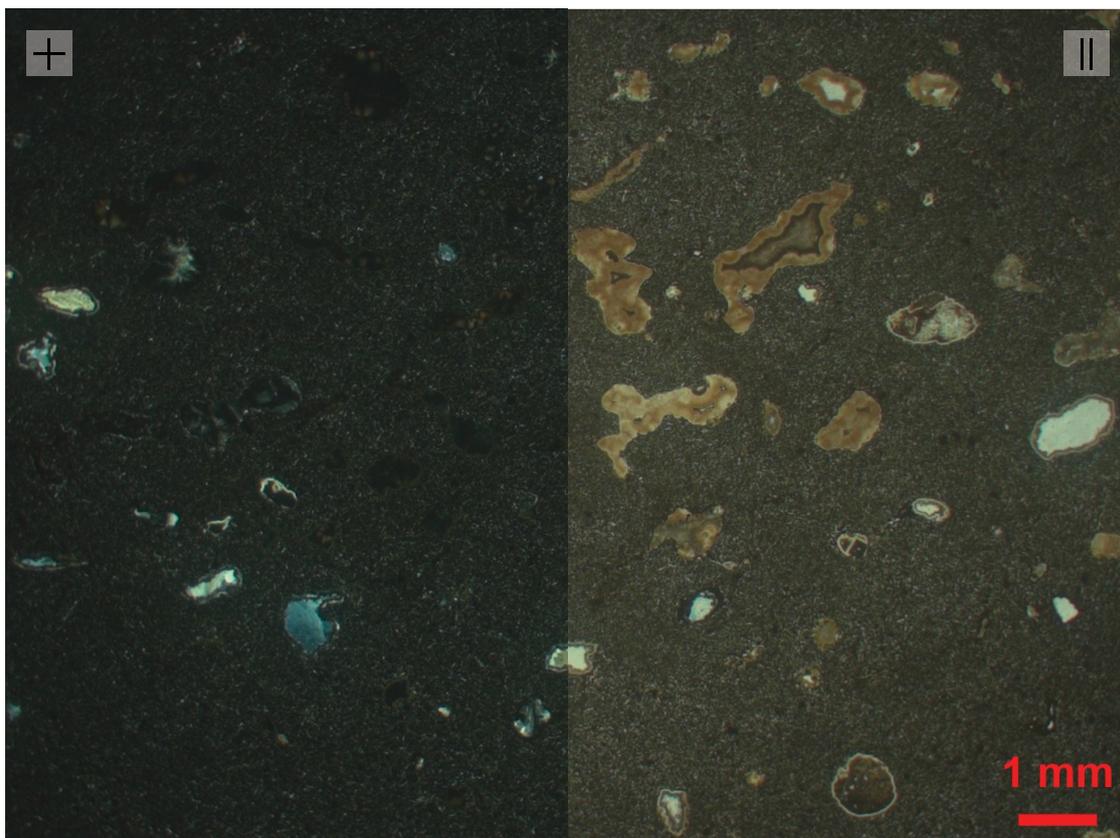
9,33% Amígdalas, pouco esféricas a irregulares;

1% Porosidade do tipo *drusy*

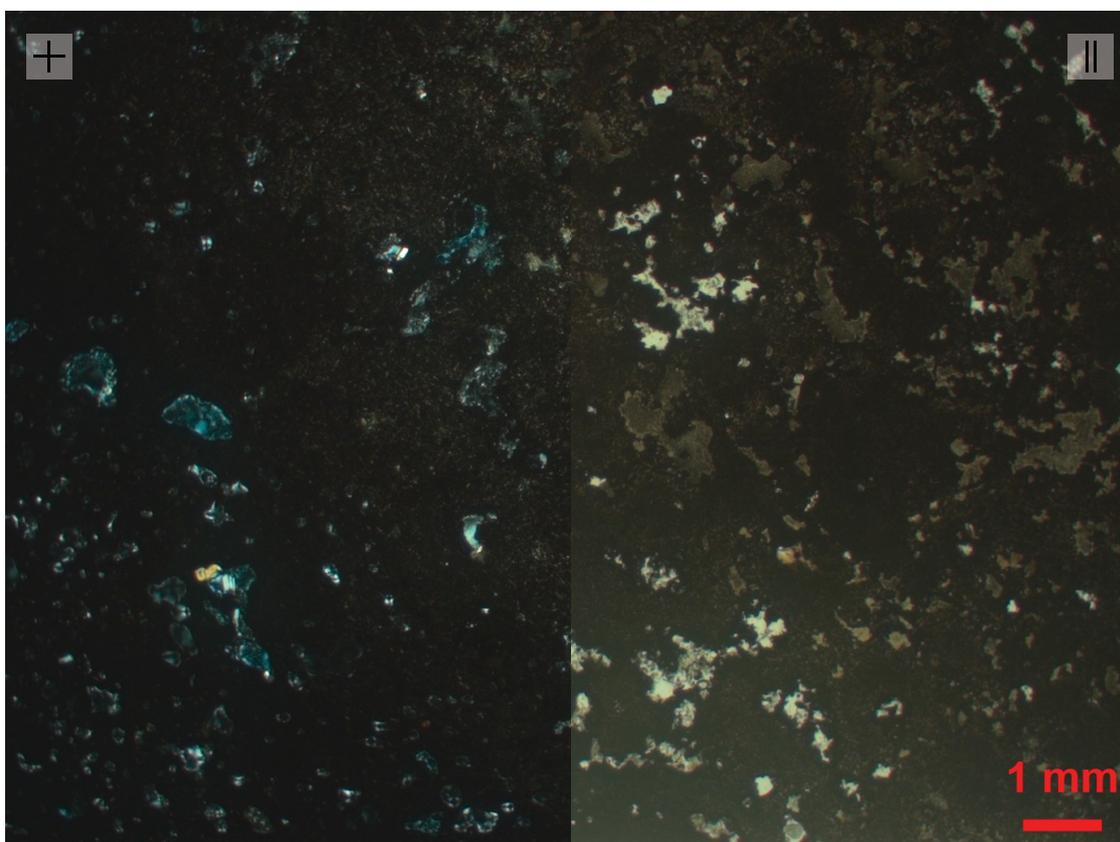
Porosidade: 1%

Classificação: Basalto maciço.

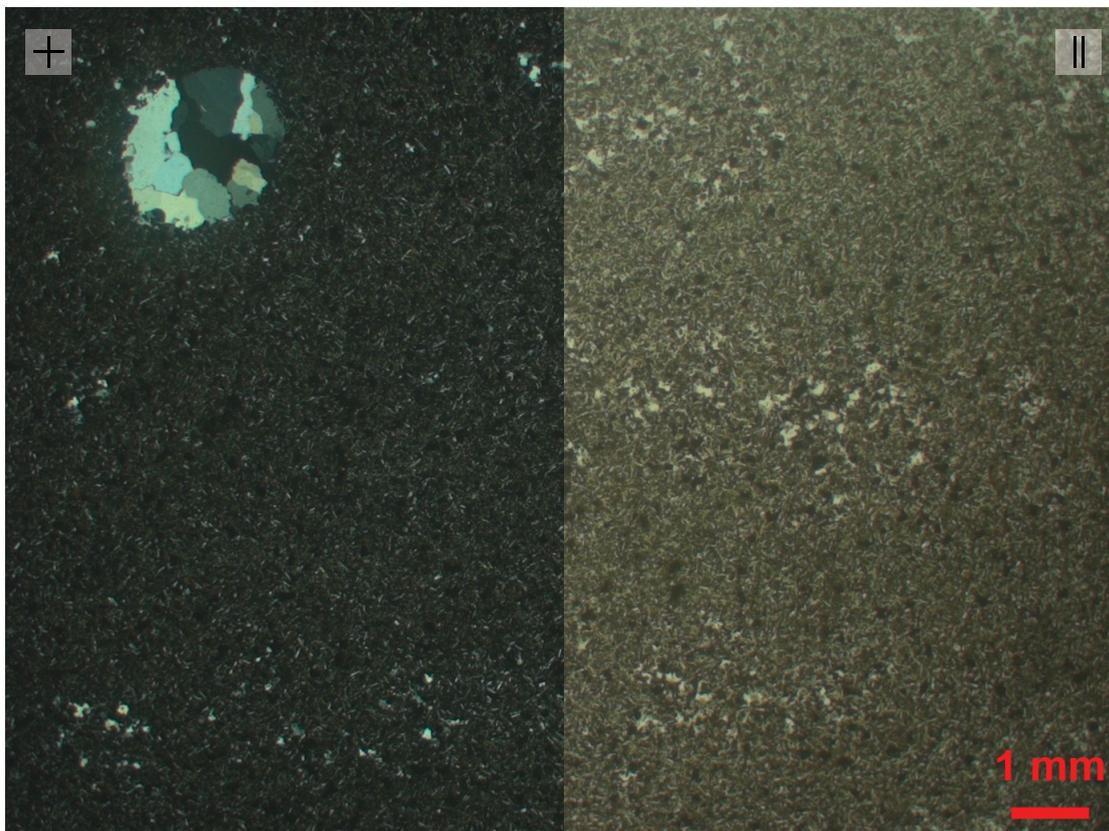
Amostra: M09A (Bbv), M09B (Bbr) e M09C (Bm)



Visão geral da rocha das lâminas M09A. Nicóis paralelos (||) e Nicóis perpendiculares (+).



Visão geral da rocha das lâminas M09B. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).



Visão geral da rocha das lâminas M09C. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM10

0505722 mE

6806723 mN

Cota: 600 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Foram identificado 2 diques básico que se cortavam perpendicularmente, ambos apresentam disjunções colunares e textura fanerítica fina. O dique 1 (D1), relativamente mais antigo possui atitudes (084;89) e uma espessura de ~20 cm. O dique 2 (D2), relativamente mais jovem cortava o D1 e possui uma atitude de (177;89) e uma espessura de 30 cm. Ambas atitudes foram obtidas com a técnica de mão esquerda. É possível observar a continuidade do D1 para norte (na cascatinha em que todos caem).

Classificação: Dique de diabásio.

Amostra: M10D1 (D1) e M10D2 (D2)

PM11

0501638 mE

6806035 mN

Cota: 839 m**Unidade:** Fm. Palmas**Litofácies:** Dpm**Descrição de campo:** Rocha ácida, possível textura granofírica de cor cinza maciço, desvitrificado (?), pouco vesiculado. Pedreira com 15 m de espessura.**Classificação:** Dacito afanítico maciço.**Amostra:** M11**PM12**

0500795 mE

6808542 mN

Cota: 695 m**Unidade:** Fm. Palmas**Litofácies:** Dah**Descrição de campo:** Rocha ácida afanítica subhorizontal com foliação bem marcada (milimétrica), alternando entre tons marrons claros com escuros. Vesículas estiradas, parcialmente preenchidas por quartzo.**Classificação:** Dacito afanítico com foliação sub-horizontal**Amostra:** M12**PM13**

0500683 mE

6808913 mN

Cota: 681 m**Unidade:** Fm. Palmas/Fm. Vale do Sol**Litofácies:** Dah/Bbr**Descrição de campo:** Contato marcado pela gruta entre uma rocha ácida foliada na porção superior e uma rocha brechada na porção inferior (topo de rubbly ou ácidas?).**Classificação:** Dacito afanítico com foliação sub-horizontal/Basalto brechado.**Amostra:** M13

PM14

0500092 mE

6810658 mN

Cota: 585 m**Unidade:** Fm. Palmas**Litofácies:** Dpm

Descrição de campo: Afloramento dividido em 2 setores, o primeiro, na qual foi retirado a amostra M14A, a rocha parece uma vulcanoclástica de composição ácida, com texturas eutaxítica e porfirítica. O segundo setor, na qual foi retirado a amostra M14B, a rocha parece um granófiro (com esferulitos?). Existe dúvida se o afloramento está in situ.

Descrição petrográfica:

M14A: Rocha vulcânica glomeroporfirítica com fenocristais de plagioclásio euédricos (1 a 1,6 mm) com textura em peneira, raros piroxênio anédrico (1 mm) e opacos anédricos (1mm). Matriz é composta vidro (alterado, oxidado e desvitrificado) com raros cristais de plagioclásio ripiforme, piroxênio e opacos anédricos. Textura amigdalóide muito presente, composta por amígdalas com formato irregular (textura diktitaxítica) desde 1,6 mm até 3,2 mm (predomínio entre 2,4 mm), as amígdalas podem estar total preenchidas ou parcialmente (porosidade residual do tipo *drusy*) por zeólita (dominante) e calcita (como uma precipitação mais tardia no centro da amígdala). Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

9,33% Plagioclásio, fenocristal;

4,33% Piroxênio, fenocristal;

3,33% Opacos, fenocristal;

74,34% Matriz, afanítica;

8,62% Amígdalas, irregular;

~0,05% Porosidade do tipo *drusy***Porosidade:** ~0,05%

M14B: Rocha vulcânica glomeroporfirítica com fenocristais de plagioclásio euédricos (0,8 a 1,5 mm) com textura em peneira, piroxênio anédrico bem alterado (0,2 a 0,8 mm, com predomínio entre 0,4 mm) e opacos anédricos (0,2 a 1 mm). Matriz é

composta vidro (alterado, oxidado e desvitrificado) com cristais de plagioclásio ripiforme, opacos anédricos e subordinadamente piroxênio anédrico. Textura amigdalóide presente, composta por amígdalas com formato esférico a irregular (textura diktitaxítica) desde 1 a 2 mm, as amígdalas podem estar total preenchidas ou mais raramente parcialmente (porosidade residual do tipo *drusy*) por zeólita (dominante) e subordinadamente por calcita (como uma precipitação mais tardia no centro da amígdala). Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

11% Plagioclásio, fenocristal;

3% Piroxênio, fenocristal;

3,33% Opacos, fenocristal;

74,67% Matriz, afanítica;

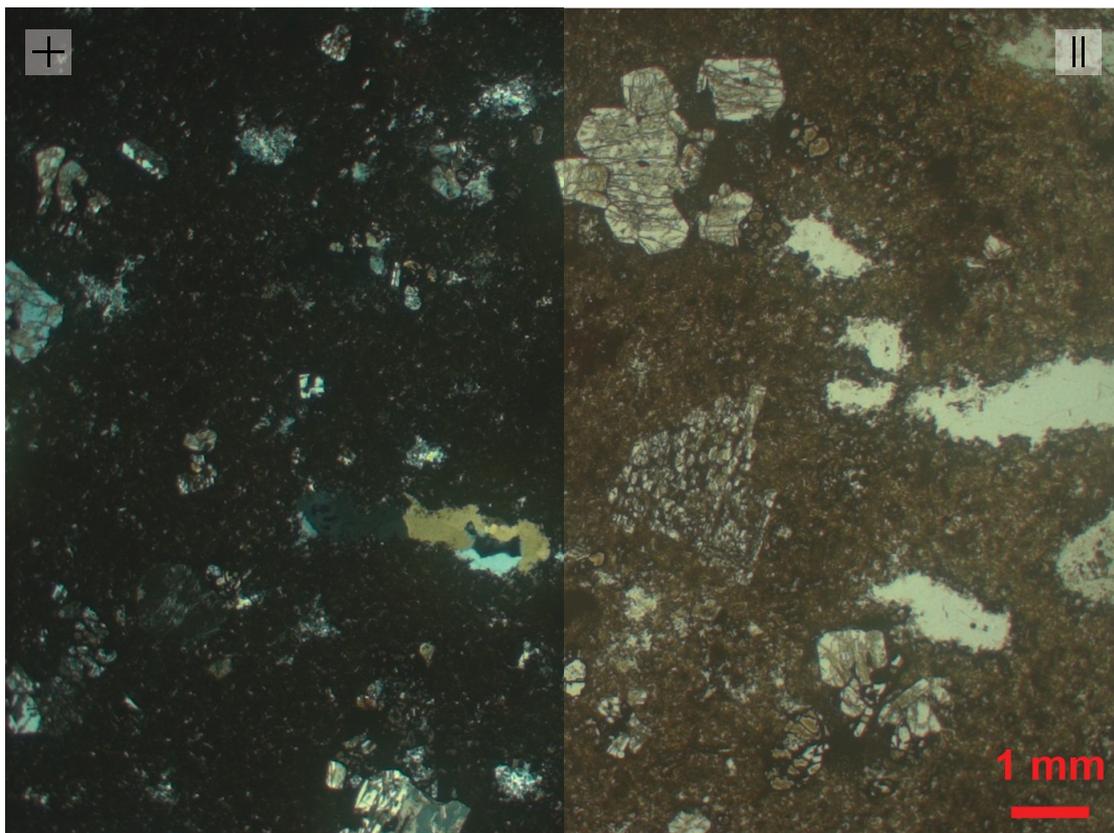
7,87% Amígdalas, esférica a irregular.

~0,13% Porosidade do tipo *drusy*

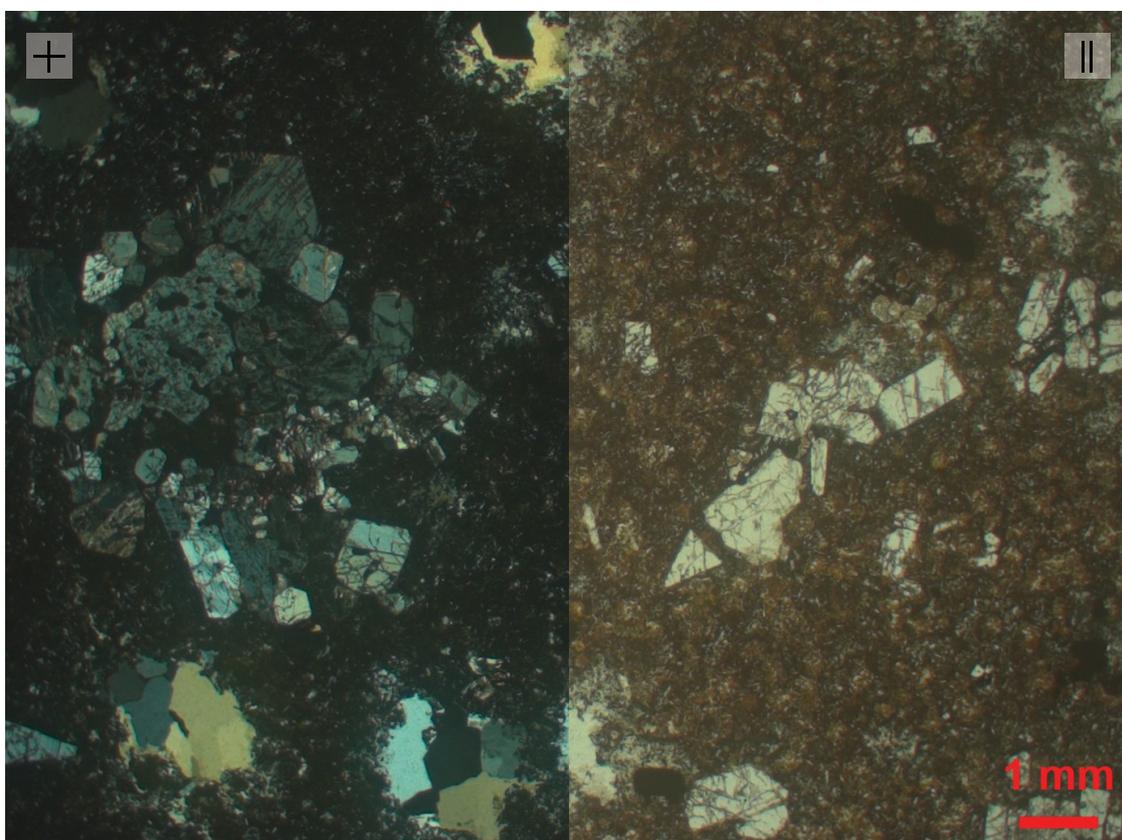
Porosidade: ~0,13%

Classificação: Dacito afanítico maciço.

Amostra: M14A e M14B



Visão geral da rocha da lâmina M14A. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).



Visão geral da rocha da lâmina M14B. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM15

0499281 mE

6810467 mN

Cota: 459 m**Unidade:** Fm. Vale do Sol**Litofácies:** Bm/Bbr

Descrição de campo: Contato com a base de uma rubbly, com o topo de uma rubbly (brechas), neste pacote aparece níveis de areia (horizontais) e verticais (injetitos?)

Classificação: Basalto maciço/Basalto brechado**Amostra:** -**PM16**

0499284 mE

6811039 mN

Cota: 348 m**Unidade:** Fm. Vale do Sol**Litofácies:** Bbv

Descrição de campo: Basalto maciço de cor cinza com “blocos” vesiculados/amígdalas (Bbv). Cortado por um dique básico afanítico (235;90) com disjunções colunares

Classificação: Basalto com blocos vesiculados**Amostra:** M16A (dique) e M16B (maciça)**PM17**

0500276 mE

6810289 mN

Cota: 609 m**Unidade:** Fm. Palmas**Litofácies:** Dah

Descrição de campo: Rocha ácida afanítica de cor cinza com foliação subhorizontal sutil.

Classificação: Dacito afanítico com foliação sub-horizontal

Amostra: -

PM18

0500289 mE

6810318 mN

Cota: 606 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr

Descrição de campo: Descendo a estrada, 30 m abaixo um afloramento alterado de brechas basálticas (“rubbly”).

Classificação: Basalto brechado

Amostra: -

PM19

0500284 mE

6810529 mN

Cota: 599 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Rocha básica porfírica de cor cinza com vesículas estiradas preenchidas por zeólitas/opala

Classificação: Basalto maciço

Amostra: M19

PM20

0500043 mE

6810774 mN

Cota: 586 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Rocha básica maciça de cor cinza, com amígdalas estiradas. Microfenocristais de máficos.

Classificação: Basalto maciço.

Amostra: M20

PM21

0499912 mE

6810853 mN

Cota: 570 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Rocha parece um granófiro com textura porfírica (feldspato) e textura traquitóide, amígdalas estiradas. Na cota de 580 m aparece essa mesma rocha.

Descrição petrográfica:

M21: Rocha vulcânica glomeroporfírica com fenocristais de plagioclásio euédricos com zonação e textura em peneira (0,5 a 2 mm), piroxênio com borda de reação para piroxênio (0,2 a 0,5 mm) bem alterados (possivelmente uralizado, transformado para tremolita/actinolita (?)) e opacos (0,3 mm). Matriz é composta vidro (alterado, oxidado e desvitrificado) com predomínio de cristais (<0,2 mm) de plagioclásio ripiforme e subordinadamente piroxênio e opacos anédricos. Textura amigdalóide presente, composta por amígdalas com formato oval e subordinadamente irregular (textura diktitaxítica) desde 2 mm até 2,4 mm, as amígdalas preenchidas por quartzo e zeólita. Ocorre também a presença de fraturas, com espessura de 0,6 mm preenchidas por quartzo e zeólita. Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

12,33% Plagioclásio, fenocristal;

6,67% Piroxênio, fenocristal;

3,33% Opacos, fenocristal;

72,67% Matriz, afanítica;

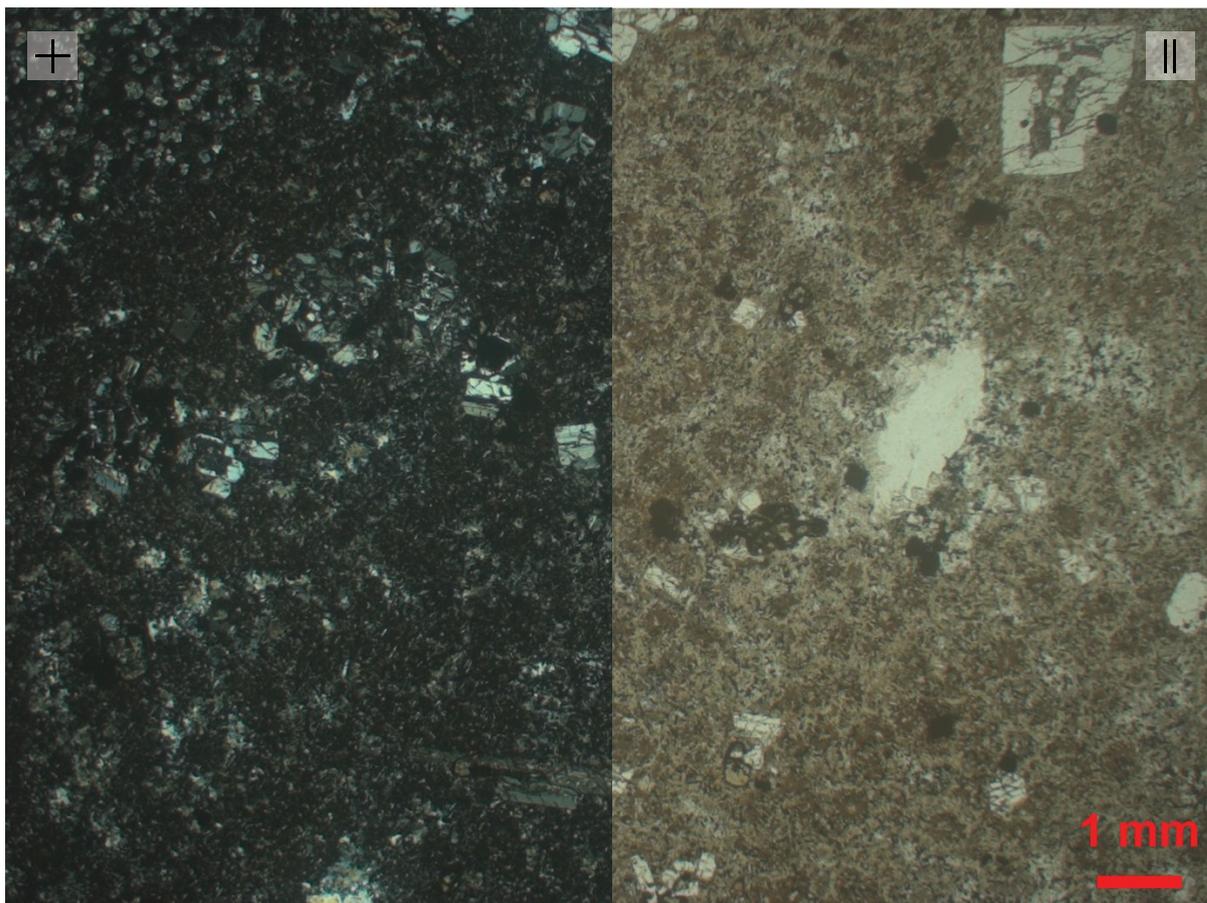
3% Amígdalas, oval a irregular.

2% Fratura.

Porosidade: 0%

Classificação: Dacito afanítico maciço.

Amostra: M21



Visão geral da rocha da lâmina M21. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM22

0499844 mE

6811057 mN

Cota: 555 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dvtp

Descrição de campo: Feldspato vitrófiro porfirítico. Abaixo em 549 m aparece uma rocha porfirítica com vesículas estiradas (topo do núcleo?). Abaixo em 539 m aparece um granófiro maciço porfirítico. Abaixo em 525 m aparece um granófiro porfirítico.

Descrição petrográfica:

M22: Rocha vulcânica glomeroporfirítica com fenocristais de plagioclásio euédricos (0,8 a 1,6 mm, predomínio entre 0,8 mm), ortopiroxênio com borda de reação para piroxênio (?) (0,5 a 1 mm) e opacos anédricos (0,16 a 0,8 mm, predomínio entre 0,25 mm). Matriz afanítica vitrofírica é composta vidro (alterado e oxidado) com

predomínio de micrólitos (<0,01 mm) de plagioclásio ripiforme e subordinadamente piroxênio e opacos anédricos. Textura amigdalóide presente, composta por amígdalas com formato esférico desde 0,4 mm até 2,4 mm (predomínio entre 0,8 mm), as amígdalas são preenchidas por um material criptocristalino de cor verde (celadonita?), zeólita e possivelmente calcedônia. Rocha aparenta ser um dacito (com base no QAP, poderia ser classificado como um andesito pela quantidade de plagioclásio).

Composição:

10,33% Plagioclásio, fenocristal;

4,33% Piroxênio, fenocristal;

2,67% Opacos, fenocristal;

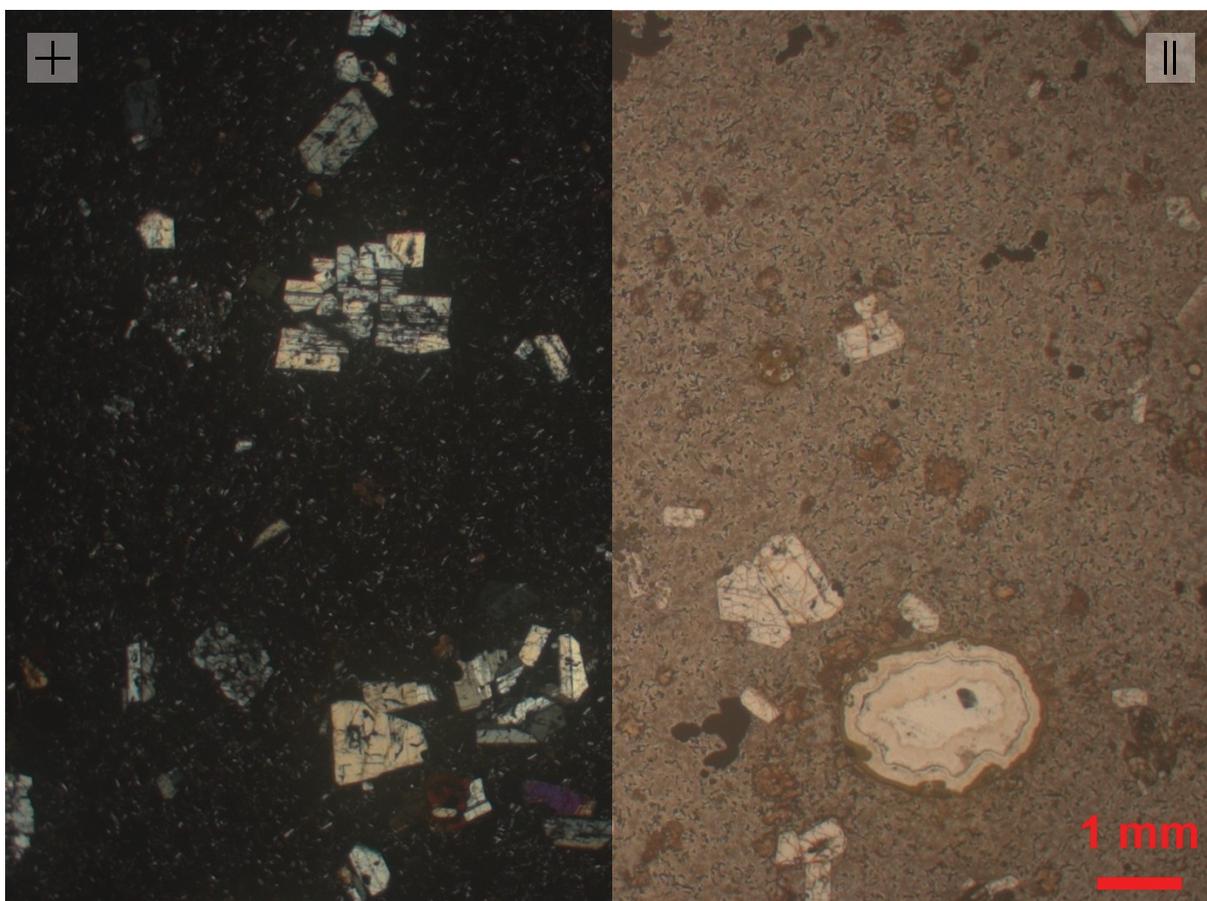
81,34% Matriz, vitrofírica com micrólitos;

1,33% Amígdalas, esférica.

Porosidade: 0%

Classificação: Dacito com textura vitrofírica maciço.

Amostra: M22



Visão geral da rocha da lâmina M22. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM23

0499659 mE

6810794 mN

Cota: 521 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Na mesma unidade vulcânica ácida. Rocha holocristalina de cor cinza, fanerítica fina, maciça, com pequenas porções localmente avermelhadas (posterior?).

Classificação: Dacito afanítico maciço

Amostra: M23

PM24

0499501 mE

6810655 mN

Cota: 502 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Rocha básica de cor cinza-rosada com textura porfirítica (plagioclásio?) e matriz afanítica. Plagioclásio com textura em peneira. Celadonita na matriz.

Descrição petrográfica:

M24: Rocha vulcânica muito alterada porfirítica com plagioclásio com dissolução parcial (1 a 1,5 mm), piroxênio anédricos alterados (0,3 mm) e opacos anédricos (0,4 mm). Matriz afanítica criptocristalina composta por material vítreo alterado com micrólitos de plagioclásio ripiforme. Rocha aparenta ser um andesito/basalto.

Composição:

10% Plagioclásio, euédrico a subédrico alterado;

4,33% Piroxênio, anédrico e alterado;

3% Opacos, anédrico;

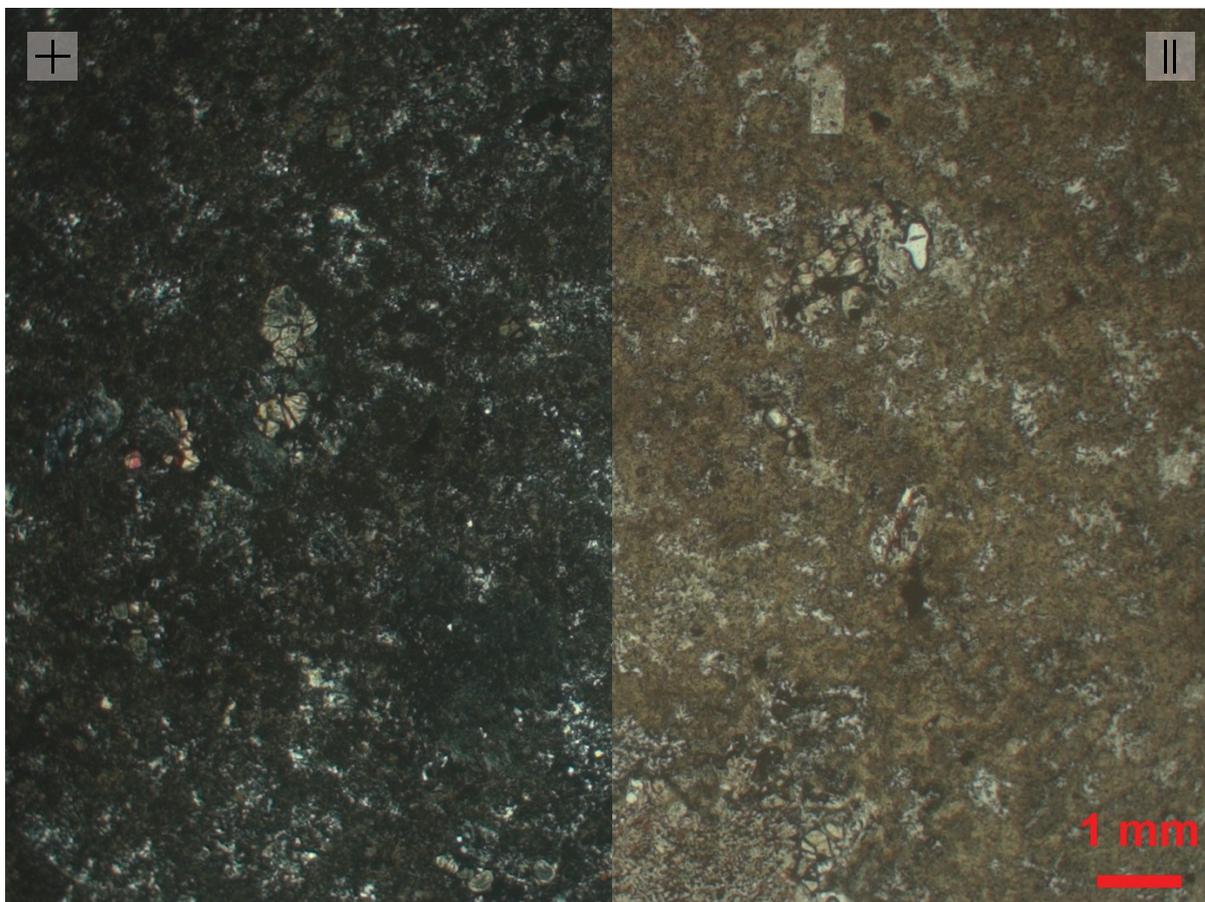
79,67% Matriz, alterado;/desvitrificada;

3% Porosidade em plagioclásio dissolvido.

Porosidade: 3%

Classificação: Basalto maciço

Amostra: M24



Visão geral da rocha da lâmina M24. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+).

PM25

0499467 mE

6810655 mN

Cota: 499 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr/Bbv

Descrição de campo: Rocha basáltica brechada de cor avermelhada (blocos escoriáceos) amigdaloides e vesículas milimétricas. Em seguida, na cota 490 m foi observado uma rocha basáltica maciça com blocos vesiculados (Bbv).

Classificação: Basalto brechado/Basalto com blocos vesiculados.

Amostra: M25A (brecha) e M25B (Bbv)

PM26

0499252 mE

6810704 mN

Cota: 425 m**Unidade:** Fm. Vale do Sol**Litofácies:** Bbr/Bm

Descrição de campo: Rocha basáltica brechada de cor avermelhada com blocos vesiculados. Abaixo em 412 m foi observada uma rocha basáltica, pedaços de lobos com pipe vesicles e cilindros de vesículas.

Classificação: Basalto brechado/Basalto maciço**Amostra:** -**PM27**

0499423 mE

6810967 mN

Cota: 396 m**Unidade:** Fm. Vale do Sol**Litofácies:** Bbr

Descrição de campo: Rocha basáltica brechada de cor avermelhada com blocos vesiculados.

Classificação: Basalto brechado**Amostra:** -**PM28**

0500085 mE

6813786 mN

Cota: 663 m**Unidade:** Fm. Palmas/Vale do Sol**Litofácies:** Dvtp/Bbr

Descrição de campo: Contato de um vitrófiro afanítico com uma rocha basáltica brechada (topo de rubbly). Na cota 647 m se encontra brechas (outro derrame?)

Classificação: Dacito com textura vitrofírica maciço/Basalto brechado

Amostra: -

PM29

0500041 mE

6813578 mN

Cota: 645 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbv/Bbr

Descrição de campo: Rocha basáltica de cor cinza afanítica com amígdalas (zeólitas) estiradas (topo de núcleo de bubbly?). Na cota 640 m parece uma brecha vesiculada. Na cota 632 m parece um núcleo vesiculado. Na cota 631 m, blocos vesiculados envolvidos pelo núcleo da bubbly. Na cota 629 m, “brecha”, um mar de blocos vesiculados.

Classificação: /Basalto com blocos vesiculados/Basalto brechado

Amostra: -

PM30

0500154 mE

6813233 mN

Cota: 608 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Rocha muito alterada com cor verde, porfirítica contém plagioclásio (alguns com textura em peneira).

Classificação: Basalto maciço.

Amostra: M30

PM31

0499943 mE

6812614 mN

Cota: 558 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Rocha ácida maciça com possível textura granofírica, similar ao ponto PM14.

Classificação: Dacito afanítico maciço.

Amostra: -

PM32

0499256 mE

6811135 mN

Cota: 360 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bm

Descrição de campo: Dique afanítico com disjunções colunares de cor cinza-esverdeado. Atitudes: (22/187) e (55/160).

Classificação: Dique de diabásio

Amostra: M32

PM33

0501782 mE

6807072 mN

Cota: 802 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Rocha ácida com estrutura de fluxo sub-horizontal marcada por desvitrificação

Classificação: Dacito afanítico sub-horizontal

Amostra: M33

PM34

500989 mE

6807389 mN

Cota: 765 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dv

Descrição de campo: Lobos ácidos com vesículas estiradas nas bordas, borda vitrofírica oxidada e alterada (sem vesículas). Vesículas arredondadas no centro.

Classificação: Lobos ácidos

Amostra: M34

PM35

500784 mE

6808783 mN

Cota: 688 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr

Descrição de campo: Brecha com blocos vesiculados ricos em zeólitas, cor avermelhada

Classificação: Brecha basáltica

Amostra: -

PM36

500145 mE

6809408 mN

Cota: 682 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr

Descrição de campo: Brecha com blocos vesiculados ricos em zeólitas, cor avermelhada

Classificação: Brecha basáltica

Amostra: -

PM37

499574 mE

6811147 mN

Cota: 373 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr/Bm

Descrição de campo: Topo brechado com núcleo maciço

Classificação: Basalto brechado/basalto macio

Amostra: -

PM38

499416 mE

6811366 mN

Cota: 380 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr

Descrição de campo: Topo brechado

Classificação: Basalto brechado

Amostra: -

PM39

499515 mE

6811702 mN

Cota: 425 m

Unidade: Fm. Vale do Sol

Litofácies: Bbr/Bm

Descrição de campo: Topo brechado com núcleo maciço

Classificação: Basalto brechado/basalto macio

Amostra: -

PM40

499674 mE

6812068 mN

Cota: 464 m

Unidade: Fm. Palmas/Fm. Vale do Sol

Litofácies: Dpm/Bbr

Descrição de campo: Dacito porfirítico maciço e basalto brechado

Classificação: Dacito porfirítico/basalto brechado

Amostra: M40

PM41

499691 mE

6812184 mN

Cota: 490 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dvtp/Dpm

Descrição de campo: Dacito vitrofírico porfírico com um dacito porfírico aciçi (desvitrificado)

Classificação: Dacito vitrofírico/Dacito granofírico

Amostra: M41

PM42

499821 mE

6812420 mN

Cota: 517 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Dacito porfírico desvitrificado

Classificação: Dacito granofírico

Amostra: M42

PM43

499533 mE

6813937 mN

Cota: 705 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Dacito afanítico sub-horizontal

Classificação: Dacito afanítico sub-horizontal

Amostra: -

PM44

498559 mE

6815544 mN

Cota: 782 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Dacito porfirítico maciço, com amígdalas esféricas.

Classificação: Dacito porfirítico

Amostra: -

PM45

500578 mE

6807824 mN

Cota: 737 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dah

Descrição de campo: Dacito afanítico sub-horizontal

Classificação: Dacito afanítico sub-horizontal

Amostra: -

PM46

500280 mE

6808296 mN

Cota: 706 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Dacito porfirítico maciço.

Classificação: Dacito porfirítico

Amostra: M46

PM47

499841 mE

6812595 mN

Cota: 561 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Dacito porfirítico maciço.

Classificação: Dacito porfirítico

Amostra: -

PM48

499748 mE

6812582. mN

Cota: 578 m

Unidade: Fm. Palmas

Litofácies: Dpm

Descrição de campo: Dacito porfirítico maciço, com amígdalas esféricas milimétricas.

Classificação: Dacito porfirítico

Amostra: -