

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DAS ROCHAS
VULCÂNICAS DO GRUPO SERRA GERAL NO VALE DO RIO
DAS ANTAS, RS**

MARCELO CANALS MEUCCI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

COORIENTADOR – Prof. Dr. Lucas de Magalhães May Rossetti

Porto Alegre, 2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DAS ROCHAS
VULCÂNICAS DO GRUPO SERRA GERAL NO VALE DO RIO
DAS ANTAS, RS**

MARCELO CANALS MEUCCI

ORIENTADOR – Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

COORIENTADOR – Prof. Dr. Lucas de Magalhães May Rossetti

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Matheus Silva Simões – Universidade Federal do Pampa

Dr. Marcos de Magalhães May Rossetti – Universidade Federal do Rio de Janeiro
(UFRJ)

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Meucci, Marcelo Canals

Estratigrafia e petrofísica das rochas vulcânicas
do Grupo Serra Geral no Vale do Rio das Antas, RS /
Marcelo Canals Meucci. -- 2024.

80 f.

Orientador: Evandro Fernandes de Lima.

Coorientador: Lucas de Magalhães May Rossetti.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2024.

1. Paraná-Etendeka. 2. facies vulcânicas. 3.
propriedades petrofísicas. 4. reservatórios
vulcânicos. 5. armazenamento de carbono. I. Lima,
Evandro Fernandes de, orient. II. Rossetti, Lucas de
Magalhães May, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o suporte e apoio nessa jornada, em especial para meus pais e meu irmão, sempre me ajudando em todas as etapas da minha vida.

Ismin, meu amor, tornando tudo mais fácil e descontraído, me empurrando quando estou sem vontade de fazer as coisas, essa conquista é tua também, muito obrigado.

Aos meus queridos amigos, Jo e Endrizzi, surtando desde a graduação. Prisco e Dudu, pelas boas risadas e jogatinas tarde da noite, perdendo, mas sempre rindo.

Chines, tenho uma grande admiração por ti. Lembro ainda em 2018, eu tímido, indo pedir para trabalhar contigo, e tu como sempre, muito disposto e empolgado, com grandes ideias, te considero um grande amigo e orientador, obrigado por todos os ensinamentos. Para o Lucas, tenho um enorme agradecimento por ti, pela orientação e parceria, por abraçar o projeto e confiar em mim para realizar a pesquisa.

Aos amigos da bolsa, Ingrid, Vitória, Brose, Tobias e Nati, pela ajuda no trabalho, ótimas discussões e risadas.

Um agradecimento em especial para as profs. Amandinha, Renata e Frank.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Agradeço também o apoio financeiro da Petrobras (Termo de Cooperação 2023/00150-4), CNPq (406980/2021-7), FAPERGS (1922510001755-3) e FAPESP (19/22084-8). A Universidade Federal do Rio Grande do Sul é reconhecida pelo apoio adicional.

RESUMO

O interesse em rochas vulcânicas tem crescido significativamente nos últimos anos devido à capacidade dessas litologias de funcionarem como reservatórios não-convencionais na produção de hidrocarbonetos e no armazenamento de CO₂. Esta investigação visa compreender melhor a capacidade e a eficiência desses litotipos para armazenar fluidos. No entanto, a diversidade de morfologias e litofácies nas sucessões vulcânicas geram estruturas permo-porosas complexas. Esta dissertação apresenta e discute, no formato do artigo científico “Estratigrafia e propriedades petrofísicas das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral: estudo de caso na região do Vale do Rio das Antas, Rio Grande do Sul, Brasil” submetido ao *Journal of South American Earth Sciences*, um estudo litoestratigráfico detalhado de uma seção da região do Vale do Rio das Antas, parte do vulcanismo Paraná-Etendeka no sul do Brasil, baseado na identificação, associação e interpretação de litofácies e na caracterização dos padrões petrofísicos dos derrames de lava. A pesquisa foi conduzida através do estudo de cinco seções colunares, integrando técnicas petrográficas e medições laboratoriais de porosidade, permeabilidade e densidade para amostras vulcânicas da Fm. Vale do Sol e da Fm. Palmas (Gr. Serra Geral). Os dados obtidos indicam que as propriedades petrofísicas são altamente controladas pela estrutura interna das lavas e pelos processos secundários. As maiores porosidades foram encontradas nos topos brechados dos derrames de lava tipo *rubbly* (26,32%) e nos dacitos vesiculares (23,62%), principalmente associadas às vesículas. Apesar de alguns valores altos de porosidade, a permeabilidade geral é baixa (>1mD); no entanto, isso não leva em consideração o grau de fraturamento observado em campo. Os baixos valores de porosidade e permeabilidade estão principalmente associados à alta presença de minerais secundários precipitados nos poros. Esses resultados demonstram um sistema de poros complexo, devido a processos primários e secundários. Compreender as propriedades petrofísicas e sua associação com as morfologias das lavas é fundamental para modelar reservatórios vulcânicos e quantificar a capacidade desses litotipos de armazenar fluidos, seja para prospecção de hidrocarbonetos ou para armazenamento geológico de CO₂.

Palavras-chave: Paraná-Etendeka; fácies vulcânicas; propriedades petrofísicas; reservatórios vulcânicos; reservatórios não-convencionais; armazenamento de carbono.

ABSTRACT

Interest in volcanic rocks has grown significantly in recent years due to the capacity of these lithologies to function as unconventional reservoirs in hydrocarbon production and CO₂ storage. This investigation aims to better understand the capacity and efficiency of these lithotypes to store fluids. However, the diversity of morphologies and lithofacies in volcanic successions generates complex permeable-porous structures. This dissertation presents and discusses, in the format of the scientific paper “Stratigraphy and petrophysical properties of the volcanic rocks of Serra Geral Group: case study in Antas River Valley region, Rio Grande do Sul, Brazil” submitted in the Journal of South American Earth Sciences, a detailed lithostratigraphic framework of a section of the Antas River Valley region, part of Paraná-Etendeka volcanism in southern Brazil, based on the identification, association and interpretation of lithofacies and the characterization of the petrophysical patterns of the lava flows. The research was conducted through the study of five columnar sections, integrating petrographic techniques and laboratory measurements of porosity, permeability and density for volcanic samples of Vale do Sol Fm. and Palmas Fm. (Serra Geral Gr.). The data obtained indicate that the petrophysical properties are highly controlled by lava internal structures and secondary processes. The highest porosities were found in the brecciated tops of rubbly lava flows (26.32%) and vesicular dacites (23.62%), mainly associated with vesicles. Despite some high porosity values, the overall permeability is low (>1mD), however, this does not take into account the degree of fracturing observed in the field. The low porosity and permeability values are mainly associated with high presence of secondary minerals precipitated in the pores. These results demonstrate a complex pore system, due to primary and secondary processes. Understanding the petrophysical properties and their association with lava morphologies is key for modelling volcanic reservoirs and quantify the capacity of these lithotypes to store fluids, whether for hydrocarbon prospection or for geological CO₂ storage.

Keywords: Paraná-Etendeka; volcanic facies; petrophysical properties; volcanic reservoirs; unconventional reservoirs; carbon storage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo com os perfis geológicos analisados, incluindo as cidades e estradas adjacentes (Fonte: autor).	16
Figura 2 - Classificação de Grandes Províncias Ígneas (traduzido de Bryan & Ernst, 2008).	18
Figura 3 - Desenho esquemático de campos de derrames do tipo compostos (A) e simples (B) (Retirado de Rossetti, 2018 - Adaptado de Walker, 1971).	20
Figura 4 - Classificação de derrames básicos com base na morfologia (Retirado de Barreto, 2016; traduzido de Duraiswami et al., 2014)	22
Figura 5 - Modelo de colocação de derrames pahoehoe inflados. A) lobo de lava se coloca na superfície, com o imediato resfriamento e formação da crosta externa, preservando o calor da lava; B) ocorre o processo de inflação pela contínua alimentação interna; C) com a interrupção da alimentação da lava, o derrame estagna e resfria, neste estágio ocorre a segregação de voláteis; D) derrame solidificado e resfriado (Retirado de Rossetti, 2018; modificado de Thordarson & Self 1998).	22
Figura 6 - Modelo de colocação de derrames rubbly pahoehoe. A) lobo de lava se coloca na superfície, e de forma semelhante a pahoehoe a porção externa resfria; B) a alimentação interna causa o processo de inflação da lava, e o aumento da pressão interna provoca o degassing e fragmentação da crosta pahoehoe previamente formada; C) a superfície da lava estabiliza e é episodicamente fragmentada por sucessivos pulsos de inflação; D) estrutura interna de derrame do tipo rubbly pahoehoe solidificado e resfriado (Retirado de Rossetti, 2018; baseado no modelo de Thordarson & Self 1998 para derrames pahoehoe e nos dados de Guilbaud et al., 2005)	23
Figura 7 - (A) Seção esquemática de fluxo de lava subaéreo de composição ácida. O lado esquerdo mostra as variações texturais internas originadas por vesiculação, desvitrificação e fragmentação de fluxo. O lado direito mostra a orientação das foliações de fluxo internas e do acamamento em brecha de talus da margem do fluxo. (B) Seção vertical do fluxo indicado na figura A. (Retirado de Simões, 2018; modificado de McPhie et al., 1993).	24
Figura 8 - Estrutura de depósitos de composição ácida do tipo SR. A) derrames com grande extensão lateral em relação à sua espessura (low-aspect ratio), autobrechas basal e terminações lobadas (Retirado de Rossetti, 2018; modificado de Branney et al., 2008).	25

Figura 9 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas. Enxames de diques: 1 - Ponta Grossa; 2 – Florianópolis; 3 –Santos-Rio de Janeiro; 4 – Paraguai; 5 – Etendeka (Modificado de Rossetti et al., 2018).	26
Figura 10 – Mapa geológico do Grupo Serra Geral na região norte do Rio Grande do Sul (Modificado de Horn et al., 2022).	27
Figura 11 – Seção colunar de derrames das formações do Grupo Serra Geral. Abreviações: CS – Crosta Superior; CI – Crosta Inferior (traduzido de Rossetti et al., 2018).	29
Figura 12 – Padrões de porosidade em rochas vulcânicas. A - Vesícula/Amigdalas; B - Dissolução de minerais primários; C - Fragmentação de minerais; D - Interclastos (autobrecha); E - Quenching; F - Fratura; G - Drusy; H - Dissolução da matriz; I - Dissolução de minerais secundários. (Fonte: autor)	31
Figura 13 - Mapa global com a localização das principais LIPs e reservatórios vulcânicos associados (Millett et al., 2024)	33
Figura 14 – Processo de mineralização de carbono em rochas basálticas com olivina (Sandalow et al., 2021).	35
Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo com a localização dos perfis colunares.	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de Grandes Províncias Ígneas conforme Koptev & Cloetingh (2024).....	18
Quadro 2 - Processos primários e secundários e a sua porosidade resultante em rochas vulcânicas (Sruoga & Rubinstein, 2007).....	30
Quadro 3 - Perfis e seções colunares utilizadas no trabalho com seus respectivos códigos. (Fonte: autor)	36
Quadro 4 – Compilação das amostras analisadas com a nomenclatura e a litofácies (Fonte: autor).....	39

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	14
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
CAPÍTULO II	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTO GEOLÓGICO.....	17
2.1 GRANDES PROVÍNCIAS ÍGNEAS.....	17
2.2 PROVÍNCIAS BASÁLTICAS CONTINENTAIS	19
2.2.1 Morfologia de lavas básicas	20
2.2.2 Morfologia de lavas ácidas	23
2.3 PROVÍNCIA ÍGNEA PARANÁ-ETENDEKA.....	25
2.4 GRUPO SERRA GERAL.....	27
2.5 PADRÕES DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE DE ROCHAS VULCÂNICAS	29
2.5.1 Padrões de porosidade e permeabilidade do Grupo Serra Geral	31
2.6 RESERVATÓRIOS VULCÂNICOS.....	33
2.6.1 Reservatórios de hidrocarbonetos em rochas vulcânicas.....	33
2.6.2 Armazenamento de CO ₂ em rochas vulcânicas.....	34
CAPÍTULO III	36
3 METODOLOGIA	36
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
3.2 ATIVIDADES DE CAMPO	36
3.3 PETROGRAFIA	38
3.4 ENSAIOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE.....	38
3.5 TRATAMENTO DOS DADOS.....	39

	12
CAPÍTULO IV	40
4 ARTIGO CIENTÍFICO	40
CAPÍTULO V	71
5. REFERÊNCIAS	71

SOBRE A ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada na forma do artigo "STRATIGRAPHY AND PETROPHYSICAL PROPERTIES OF THE VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP: CASE STUDY IN ANTAS RIVER VALLEY REGION, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL." submetido na revista *Journal of South American Earth Sciences* (classificação Qualis Capes A3 – N3). Sendo assim, sua organização compreende as seguintes partes principais:

CAPÍTULO I: Introdução ao tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado, incluindo justificativa e localização da área de estudo.

CAPÍTULO II: Revisão bibliográfica e contexto geológico sobre o tema.

CAPÍTULO III: Materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento das atividades.

CAPÍTULO IV: Artigo científico publicado em periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes, escrito pelo autor durante o desenvolvimento da sua dissertação de mestrado. O artigo apresenta os resultados obtidos, a discussão e conclusão.

CAPÍTULO V: Referências bibliográficas da dissertação.

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a caracterização do problema estudado no trabalho, a justificativa do projeto, objetivos gerais e específicos e localização da área de estudo.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A investigação das propriedades petrofísicas dos sistemas vulcânicos visa compreender melhor a capacidade destes litotipos em armazenar fluidos e as condições destes de fluírem ou escoarem, o que explica o interesse da indústria de hidrocarbonetos em reservatórios não-convencionais. Neste contexto, a construção de um arcabouço estratigráfico apoiados em dados de campo em escala de detalhe, pode gerar modelos úteis para a prospecção e extração de hidrocarboneto, bem como para o armazenamento de CO₂ antropogênico (e.g., CarbFix, Islândia - Matter *et al.*, 2009; Wallula, EUA - McGrail *et al.*, 2014).

A diversidade das morfologias e litofácies em sucessões vulcânicas geram sistemas permoporosos complexos, com diferentes combinações de padrões de porosidade e permeabilidade. Este cenário é ainda mais complexo devido aos processos secundários que atuam no preenchimento e/ou dissolução dos poros.

A análise estratigráfica de detalhe, com a tipificação dos derrames e distribuição das litofácies, em conjunto a qualificação e quantificação dos poros (porosidade e permeabilidade) permite construir modelos de padrões permoporosos em sucessões vulcânicas.

Esta dissertação avança nas discussões iniciadas no Trabalho de Conclusão de Curso “Estratigrafia e padrões de porosidade das rochas vulcânicas da região da Cachoeira da Mulada, Caxias do Sul, RS”, realizado pelo autor, com a inclusão de novos dados de perfis estratigráficos, estudos petrográficos das litofácies identificadas e análises laboratoriais de porosidade, permeabilidade e densidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os estudos de cunho litoestratigráfico no Grupo Serra Geral (GSG) são recentes (Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2018; Horn *et al.*, 2022), assim como trabalhos relacionando as características petrofísicas dos derrames (e.g., Barreto *et al.*, 2017; Rossetti *et al.*, 2019; Becker *et al.*, 2019; Meucci, 2022), esses dados são de grande importância, pois o GSG pode ser considerado como um análogo do vulcanismo presente nas bacias da margem brasileira.

O detalhamento estratigráfico e do sistema permoporoso é crucial para a construção de modelos de reservatórios vulcânicos, buscando entender a capacidade e eficiência desses reservatórios, seja para um objetivo de prospecção e exploração de hidrocarbonetos ou para o armazenamento geológico de CO₂. Além disso, a região estudada está inserida no contexto do Sistema Aquífero Serra Geral, e o estudo da porosidade e sua relação com os derrames auxilia na compreensão do fluxo e armazenamento de água subterrânea neste aquífero.

1.3 OBJETIVOS

Propõe-se construir um arcabouço litoestratigráfico de parte da região do Vale do Rio das Antas, a partir da identificação de litofácies e caracterização dos padrões petrofísicos dos derrames. Como objetivos específicos, propõe-se:

- 1) Descrever e interpretar as litofácies e associações destas para a construção de um arcabouço estratigráfico da região estudada;
- 2) Correlacionar os perfis de áreas adjacentes previamente estudadas
- 3) Descrição petrográfica, caracterização e quantificação do sistema permoporoso associado as litofácies

1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região do Vale do Rio das Antas fica localizada na Serra Gaúcha, nordeste Rio Grande do Sul (Brasil) entre as coordenadas 29°00' - 28°40' S e 50°45' - 50°45' W (Figura 1). Nesta área foram estudados dois trechos principais, o primeiro na BR-116, entre os municípios de São Marcos (km 103) e Campestre da Serra (km 88); o segundo trecho consiste em uma estrada vicinal entre os distritos de Criúva (Caxias do Sul) e São Manoel (Campestre da Serra), passando pela Ponte do Korff sobre o Rio das Antas. A Cachoeira da Mulada fica localizada na Reserva Bertussi no distrito de Criúva (Caxias do Sul).

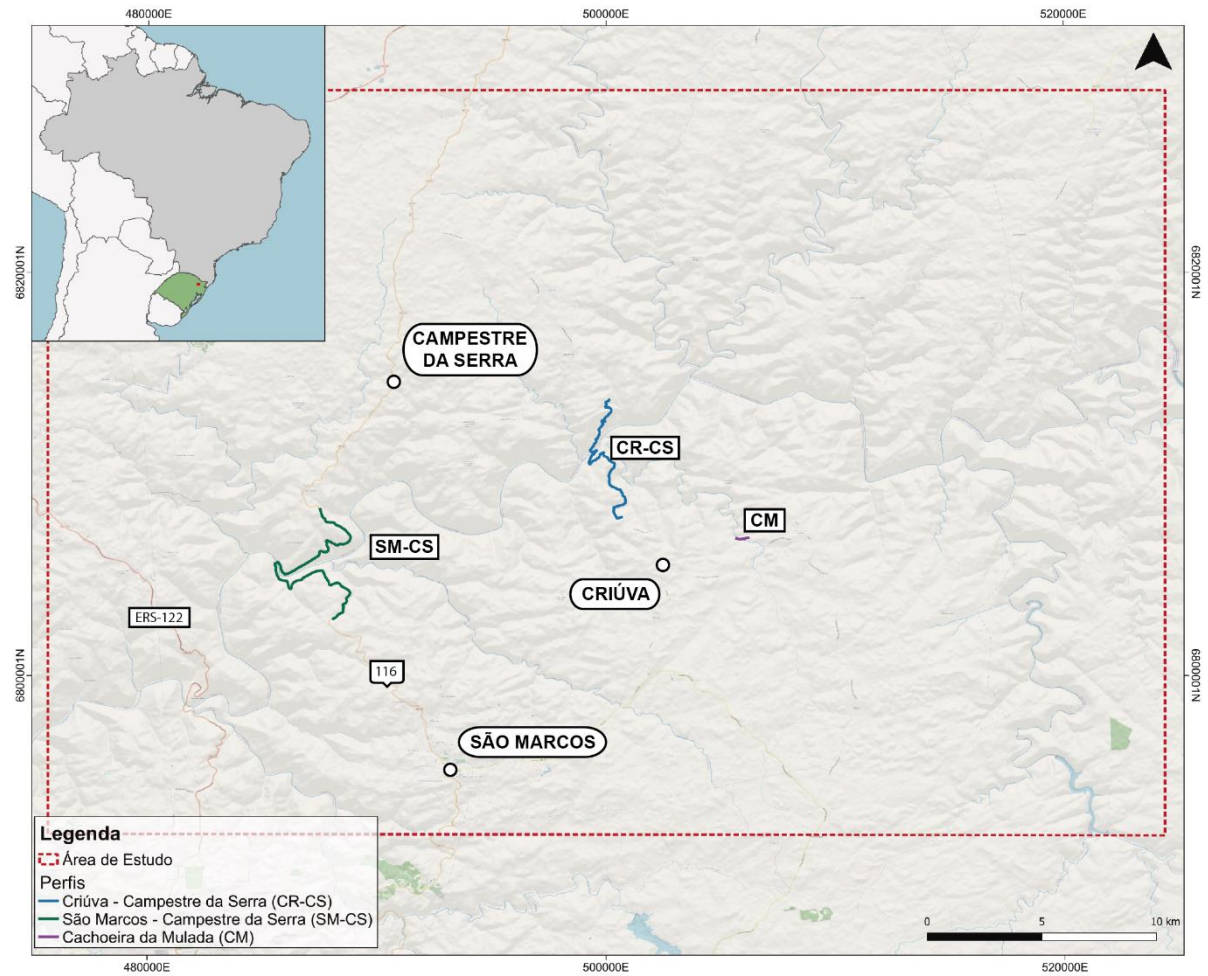


Figura 1 - Localização da área de estudo com os perfis geológicos analisados, incluindo as cidades e estradas adjacentes (Fonte: autor).

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTO GEOLÓGICO

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica e contextualização geológica da área de estudo, apresentando os principais conceitos associados aos grandes eventos vulcânicos, características físicas dos derrames e por fim uma revisão sobre o potencial destes litotipos como reservatórios de hidrocarbonetos e armazenamento geológico de CO₂.

2.1 GRANDES PROVÍNCIAS ÍGNEAS

As Grandes Províncias Ígneas (*Large Igneous Provinces* – LIPs), foram definidas inicialmente por Coffin & Eldholm (1992, 1994), descritas como grandes volumes de rochas extrusivas e intrusivas predominantemente básicas (ricas em Mg e Fe), que se originam por processos distintos da expansão normal do assoalho oceânico. Incluindo diferentes tipos de eventos, desde derrames basálticos continentais (*continental flood basalts*), margens passivas vulcânicas, platôs oceânicos, cordilheiras submarinas, montes submarinos e derrames basálticos oceânicos (*ocean basin flood basalts*).

Bryan & Ernst (2008) reconheceram a necessidade de revisar a definição de Coffin & Eldholm (1994) por ser muito abrangente. Os autores enfatizaram quatro atributos, o grande volume, a curta duração ou pulsos e a configuração intraplaca ou geoquímica. Assim, definiram as Grandes Províncias Ígneas como províncias magmáticas com extensões territoriais superiores a 0,1 Mkm², volumes ígneos superiores a 0,1 Mkm³ e duração do evento de cerca de 50 Ma. Apresentam configurações tectônicas ou afinidades geoquímicas intraplaca, e são caracterizadas por pulsos ígneos de curta duração (~1–5 Ma), durante os quais uma grande proporção (superior a 75%) do volume ígneo total foi colocado.

As LIPs podem ser classificadas em relação ao seu ambiente de ocorrência, podendo ser continentais ou oceânicas (Figura 2), além disso podem ser subdivididas de acordo com suas características de formação, tais como ambiente tectônico, composição geoquímica e morfológica (Bryan & Ernst, 2008).

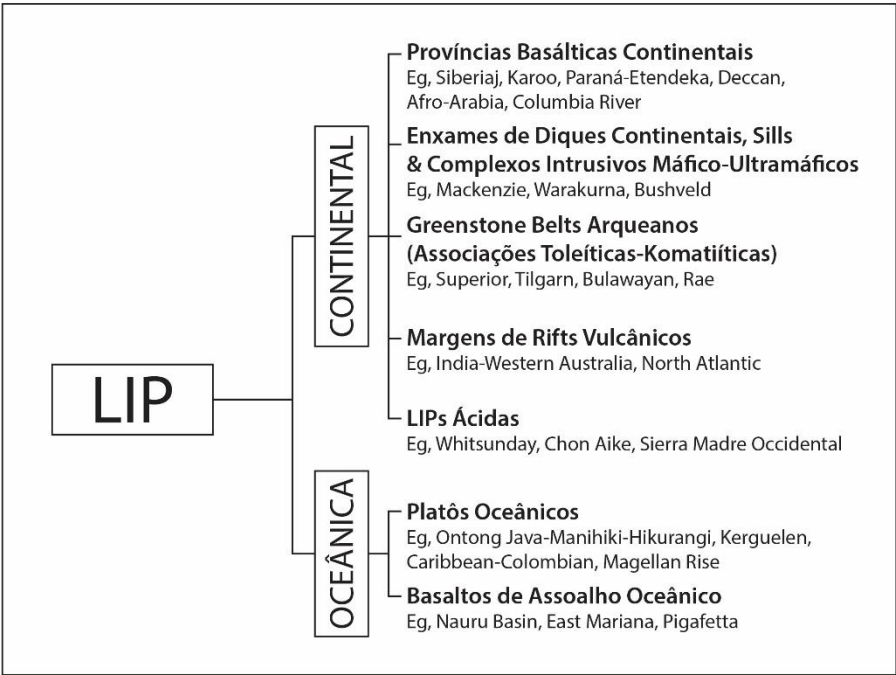


Figura 2 - Classificação de Grandes Províncias Ígneas (traduzido de Bryan & Ernst, 2008).

Uma nova metodologia de classificação de LIPs foi proposta por Koptev & Cloetingh (2024), baseando-se na variabilidade dos processos de fragmentação continental.

Quadro 1 - Classificação de Grandes Províncias Ígneas conforme Koptev & Cloetingh (2024)

Tipo de LIP	Característica	Exemplo
<i>LIP-Shirker</i>	Sem ruptura e formação de crosta oceânica.	Siberian Traps
<i>LIP-Producer</i>	Colocação da pluma determina a localização e o período da ruptura continental.	LIP Madagascar
<i>LIP-Trigger</i>	A colocação da pluma determina a localização inicial da deformação pré-ruptura na litosfera; a atividade magmática é precedida pelo rifteamento continental.	Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) e LIP Karoo
<i>LIP-Attractor</i>	Ruptura continental não ocorre na localização da pluma, formando primeiro uma margem passiva não-vulcânica e depois uma margem passiva vulcânica.	LIP Paraná-Etendeka e LIP Afar

<i>LIP-Dornröschen</i> (“re-awakened”)	Anomalia termal “oculta” por um período sob uma litosfera espessa pode ser reinicializada pelos movimentos laterais das placas tectônicas.	North-Atlantic Igneous Province (NAIP)
<i>LIP-Sleeper</i>	Anomalia termal descoberta por sísmica ou outros métodos, mas sem evidências de magmatismo.	Manus Basin (Western Pacific)

2.2 PROVÍNCIAS BASÁLTICAS CONTINENTAIS

As Províncias Basálticas Continentais (PBC) representam imensas acumulações de lavas registrados na história da Terra. As PBCs são comumente associadas com a fragmentação e o rifteamento da crosta continental (Courtillet *et al.*, 1999), em grande parte devido à presença de anomalias térmicas no manto superior, que são capazes de gerar altas taxas de produção de magma (Ernst & Buchan, 2003). As PBCs estão amplamente distribuídas por todos os continentes do mundo, cobrem extensas áreas e normalmente apresentam espessuras expressivas de derrames de lava. O magmatismo em PBCs é predominantemente de afinidade toleítica e de composição básica; no entanto, em algumas províncias, há ocorrência de composições ácidas (e.g., Formação Palmas – Paraná-Etendeka; Snake River – EUA).

Para descrição da sequência de derrames em PBCs, Self *et al.* (1998) utilizaram critérios de hierarquia e escala dos fluxos de lava, na qual são conceitos descritivos e que funcionam melhor em regiões com vulcanismo ativo ou recente (e.g., Havai e Islândia): **(1) Campo de derrames (*lava flow fields*)** consiste nos produtos agregados de um evento eruptivo, compostos por um ou mais derrames. Sua identificação e distinção são baseadas na composição química das lavas, além da presença de indicadores como paleossolos ou depósitos sedimentares e vulcanoclásticos, que sugerem uma pausa na atividade vulcânica; **(2) Derrame (*lava flow*)** é o resultado de uma única e contínua efusão, tipicamente de curta duração e com características homogêneas, tanto químicas quanto petrográficas. Estes derrames constituem os principais elementos dos campos de derrames; **(3) Lobos** são corpos de lava com geometrias lobulares e espessuras variadas, geralmente entre 0,5 e 5 metros, delimitados por margens resfriadas.

Para o estudo em PBCs antigas (e.g., Paraná-Etendeka, Deccan, Karoo) é possível adotar uma terminologia mais simples e direta, conforme Walker (1971).

Nestas províncias o grau de alteração das rochas ou de vegetação podem ser altos, dificultando o reconhecimento da extensão total dos derrames. As lavas basálticas podem ser descritas como (Figura 3): **(1) derrames compostos**, quando podem ser subdivididas em unidades de lava ou pequenos lobos, e são marcadas pelas superfícies de resfriamentos dos lobos; e **(2) derrames simples**, apresentam uma morfologia única, como um grande lobo individual, muitas vezes com geometria tabular (*e.g.*, *sheet/tabular flow*), geralmente associadas a taxas de efusão maiores com grandes volumes de lava (*flood basalts*). Jerram (2002) utiliza uma nova nomenclatura e classificação para os derrames compostos e simples de Walker (1971), adotando conceitos de arquitetura de fácies, distribuição lateral e empilhamento de lavas: **(1) tabular clássica**, derrames com grande extensão lateral (quilômetros a dezenas de quilômetros) com grandes espessuras (20-50 m), com ou sem disjunções colunares, representativa dos derrames simples; **(2) composta anastomosada**, lobos de lava pouco espessos (centímetros a metros), representativa dos derrames compostos.

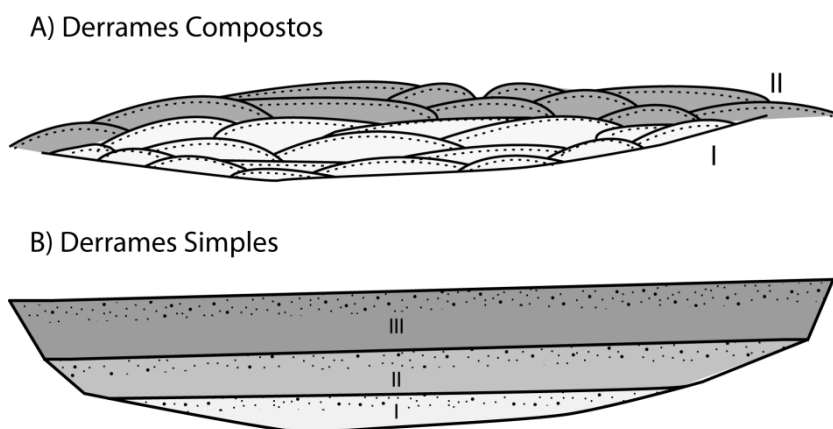


Figura 3 - Desenho esquemático de campos de derrames do tipo compostos (A) e simples (B) (Retirado de Rossetti, 2018 - Adaptado de Walker, 1971).

2.2.1 Morfologia de lavas básicas

Derrames basálticos subaéreos podem ser classificados de modo geral como uma série continua com base em suas feições de superfície e estruturação interna. Para lavas basálticas, Macdonald (1953) descreveu no Havaí três tipos de derrames: tendo como membros finais *pahoehoe* (superfície lisa ou em cordas) e *A'a* (mais fragmentado, brechas), e lava em bloco (blocos menos fragmentados e mais regulares) como um membro intermediário. Posteriormente, foram descritos e classificados outros tipos de derrames transicionais (Figura 4), 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* (Figura 5) podem ser identificados por suas superfícies em corda, onduladas, lobadas ou suaves. Internamente são divididas em crosta superior, núcleo e crosta inferior (Macdonald, 1953; 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 (Aubele *et al.*, 1988; Self *et al.*, 1997). No núcleo, é comum a presença de disjunções colunares bem desenvolvidas e baixa quantidade de vesículas primárias, quando presentes, podem ser associadas a cavidades do tipo diktitaxítica (Anderson *et al.*, 1984). No núcleo é comum a presença de estruturas de segregação (concentração de voláteis no final da cristalização) como vesículas em lençol (*sheet vesicles*), cilindros de vesículas e vesículas de grande porte. A crosta inferior é caracterizada por ser pouco espessa e com poucas vesículas, sendo comum a presença de *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* (Figura 6) 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; 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.

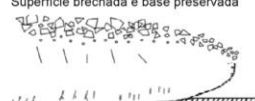
Tipo de lava	Definição	Desenho esquemático	Referências relacionadas	Significado
<i>Pahoehoe</i>	Um termo havaiano que significa lava básica não fragmentada e ondulada que possui superfícies em corda, onduladas, lobadas ou suaves. Lavas <i>pahoehoe</i> são compostas de diversas unidades.	Unidades múltiplas 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) Duraiswami (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) Duraiswami (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 pipes 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>Rubby 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) Duraiswami <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 4 - Classificação de derrames básicos com base na morfologia (Retirado de Barreto, 2016; traduzido de Duraiswami *et al.*, 2014)

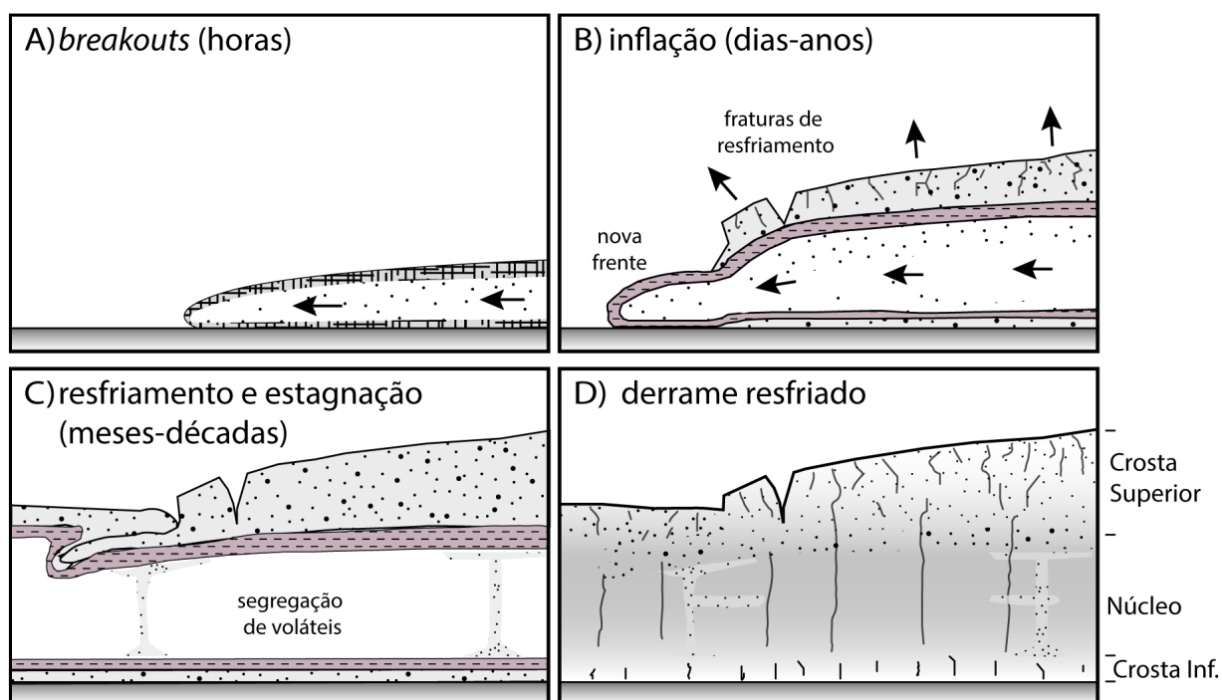


Figura 5 - Modelo de colocação de derrames *pahoehoe* inflados. A) lobo de lava se coloca na superfície, com o imediato resfriamento e formação da crosta externa, preservando o calor da lava; B) ocorre o processo de inflação pela contínua alimentação interna; C) com a interrupção da alimentação da lava, o derrame estagna e resfria, neste estágio ocorre a segregação de voláteis; D) derrame solidificado e resfriado (Retirado de Rossetti, 2018; modificado de Thordarson & Self 1998).

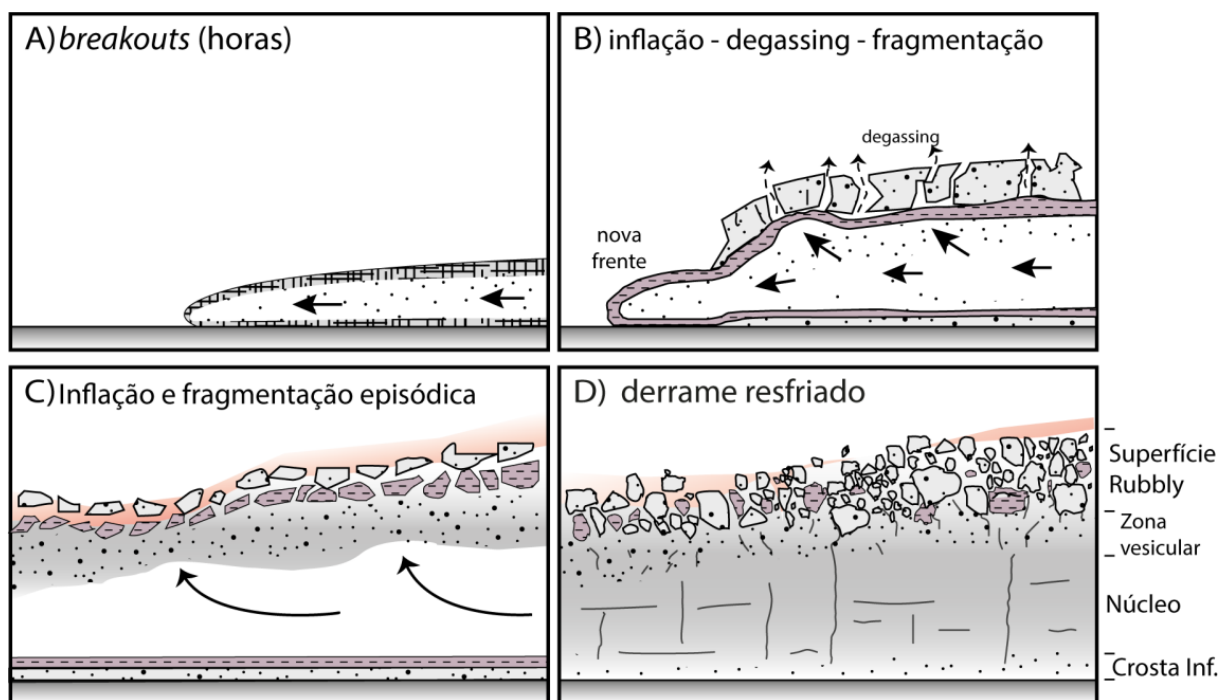


Figura 6 - Modelo de colocação de derrames *rubbly pahoehoe*. A) lobo de lava se coloca na superfície, e de forma semelhante a *pahoehoe* a porção externa resfia; B) a alimentação interna causa o processo de inflação da lava, e o aumento da pressão interna provoca o *degassing* e fragmentação da crosta *pahoehoe* previamente formada; C) a superfície da lava estabiliza e é episodicamente fragmentada por sucessivos pulsos de inflação; D) estrutura interna de derrame do tipo *rubbly pahoehoe* solidificado e resfriado (Retirado de Rossetti, 2018; baseado no modelo de Thordarson & Self 1998 para derrames pahoehoe e nos dados de Guilbaud *et al.*, 2005)

2.2.2 Morfologia de lavas ácidas

Rochas vulcânicas ácidas estão presentes na maioria das Províncias Basálticas Continentais e margens rifteadas vulcânicas. Elas podem compor partes significativas do arcabouço estratigráfico e atingir volumes eruptivos superiores a 10^4 km³ (Bryan *et al.*, 2002). Ignimbritos normalmente são o tipo predominante de rocha vulcânica ácida nestas províncias vulcânicas, porém diversas morfologias de depósitos podem ser identificadas: depósitos piroclásticos de queda, reoignimbritos, domos e derrames de lavas.

Lavas riolíticas apresentam uma grande variedade de litofácies, desde brechas e vitrófiros (normalmente nas porções exteriores dos derrames), vesículas, esferulitos, foliações de fluxo (comum estarem dobradas), litofácies cristalinas e com granulometria fina (porções mais internas do derrame) (Fink, 1983; Cas & Wright, 1988; McPhie *et al.*, 1993) (Figura 7).

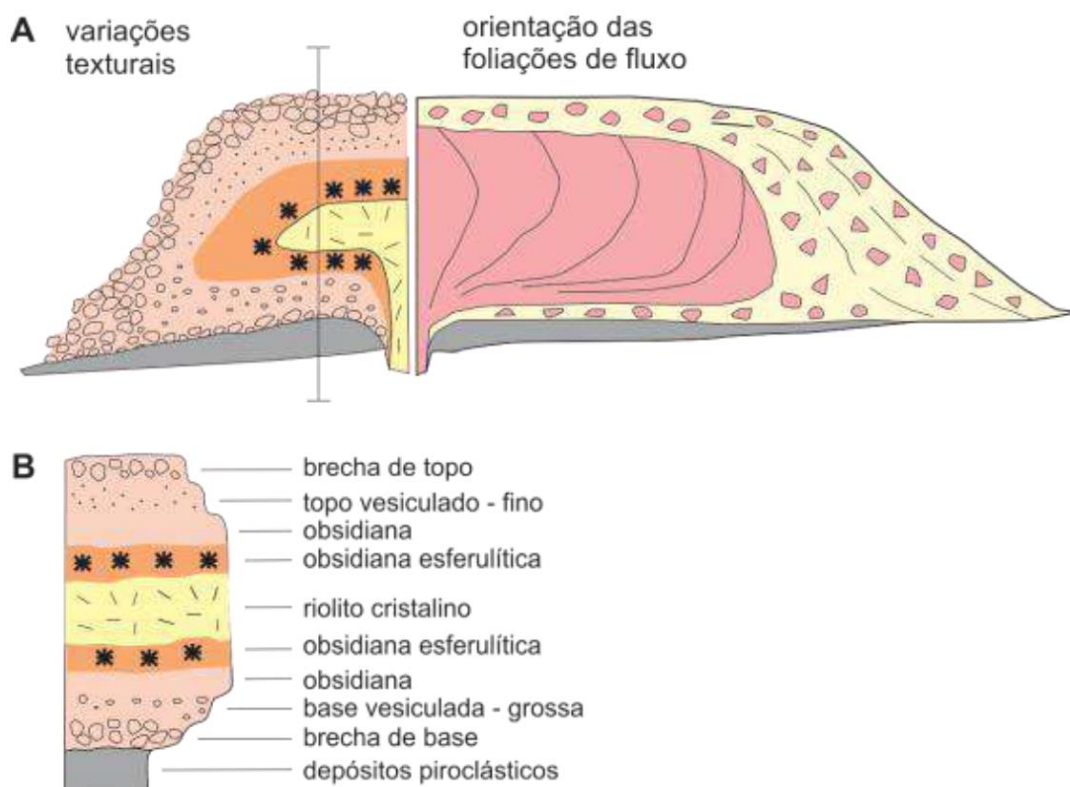


Figura 7 - (A) Seção esquemática de fluxo de lava subaéreo de composição ácida. O lado esquerdo mostra as variações texturais internas originadas por vesiculação, desvitrificação e fragmentação de fluxo. O lado direito mostra a orientação das foliações de fluxo internas e do acamamento em brecha de talus da margem do fluxo. (B) Seção vertical do fluxo indicado na figura A. (Retirado de Simões, 2018; modificado de McPhie *et al.*, 1993).

Além das morfologias clássicas, lavas de composição ácida podem exibir formas atípicas, como camadas tabulares com grande extensão lateral em relação à sua espessura (*low-aspect ratio*). Essas unidades, denominadas vulcanismo tipo-SR (em referência à Província *Snake River*), estão associadas a erupções de alta temperatura, superiores a 1000°C (Branney *et al.*, 2008). A Formação Palmas, composta por unidades vulcânicas ácidas do Grupo Serra Geral (Província Ígnea Paraná-Etendeka), apresenta características semelhantes aos depósitos vulcânicos do tipo-SR (Besser *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2019).

As lavas ácidas do tipo-SR (Figura 8) são caracterizadas por autobrechas basais e núcleos maciços microcristalinos, frequentemente apresentando bandamento de fluxo, disjunções colunares e tabulares. Esferulitos e litofises também são encontrados nas porções inferiores do núcleo (Branney *et al.*, 2008).

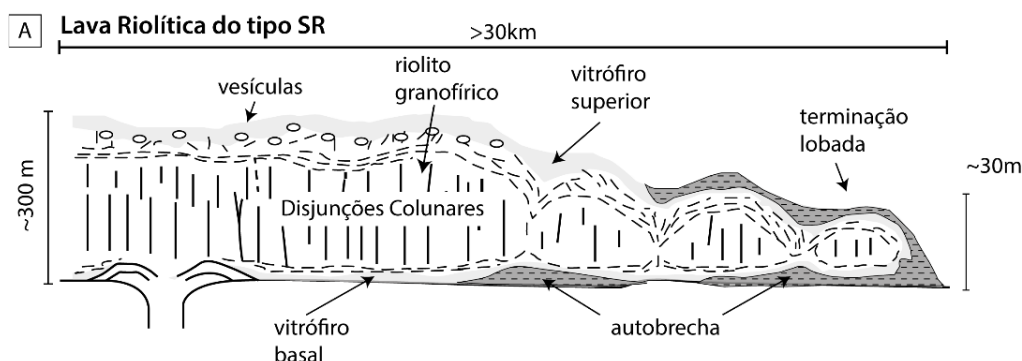


Figura 8 - Estrutura de depósitos de composição ácida do tipo SR. A) derrames com grande extensão lateral em relação à sua espessura (*low-aspect ratio*), autobrechas basal e terminações lobadas (Retirado de Rossetti, 2018; modificado de Branney *et al.*, 2008).

2.3 PROVÍNCIA ÍGNEA PARANÁ-ETENDEKA

A Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE) (Figura 9) é uma LIP continental, também caracterizada como uma Província Basáltica Continental, datada do Cretáceo Inferior, que precede a ruptura do supercontinente Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico (Gladczenko *et al.*, 1997). O magmatismo da PIPE possui afinidade toleítica, sendo dominado por lavas subaéreas de composição básica, com a presença subordinada de vulcânicas ácidas. As rochas intrusivas do sistema são representadas por cinco grandes enxames de diques, localizados nas regiões de Ponta Grossa, Florianópolis, Santos - Rio de Janeiro, Paraguai e Etendeka (Raposo *et al.*, 1998; Florisbal *et al.*, 2014).

Em termos geoquímicos, a província pode ser dividida em duas regiões com base no teor de TiO_2 (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985). A porção sul da PIPE é caracterizada por baixo Ti/Y (<310), incluindo os magmas básicos dos tipos Gramado e Esmeralda, além das rochas ácidas do tipo Palmas (Mantovani *et al.*, 1985; Peate *et al.*, 1992). A porção norte, por outro lado, é caracterizada por alto Ti/Y (>310), composta por basaltos dos tipos Ribeira, Pitanga e Paranapanema, bem como pelas rochas ácidas do tipo Chapecó (Peate *et al.*, 1997). O magma tipo Urubici, embora de alto TiO_2 , está intercalado com o tipo Gramado na porção sul da PIPE (Peate *et al.*, 1999).

A maior parte da PIPE está situada na América do Sul (90%), abrangendo os países Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; o restante (10%) está localizado no sudoeste da África, na Namíbia e Angola (Piccirillo & Melfi, 1988; Peate, 1997). Na América do Sul, a província cobre uma área de 917.000 km^2 e 600.000 km^3 , considerando as rochas vulcânicas e intrusivas (Frank *et al.*, 2009). Possui uma espessura média de 700 metros, podendo alcançar até 1750 metros na porção central

da Bacia do Paraná (Piccirillo & Melfi, 1988). As rochas vulcânicas da PIPE exibem uma rápida extrusão entre 135,5 e 133,2 Ma, com o pico do magmatismo durando de 1,6 a 3 Ma (Gomes & Vasconcelos, 2021). As rochas ácidas da província têm idades mais recentes, a Formação Palmas apresentou uma rápida extrusão em 133,6 Ma, com duração de $0,12 \pm 0,11$ Ka, enquanto a Formação Chapecó está limitada a 132,9 Ma, com a atividade magmática durando 700 Ka (Rocha et al., 2020).

Dentro do contexto cronoestratigráfico da Bacia do Paraná, onde a PIPE está situada no Brasil, ela marca o topo da sequência Gondwana III, uma supersequência vulcanossedimentar de idade Jurássica-Eocretácica (Milani *et al.*, 2007), representada pelo Grupo Serra Geral (Rossetti *et al.*, 2018; Horn *et al.*, 2022).

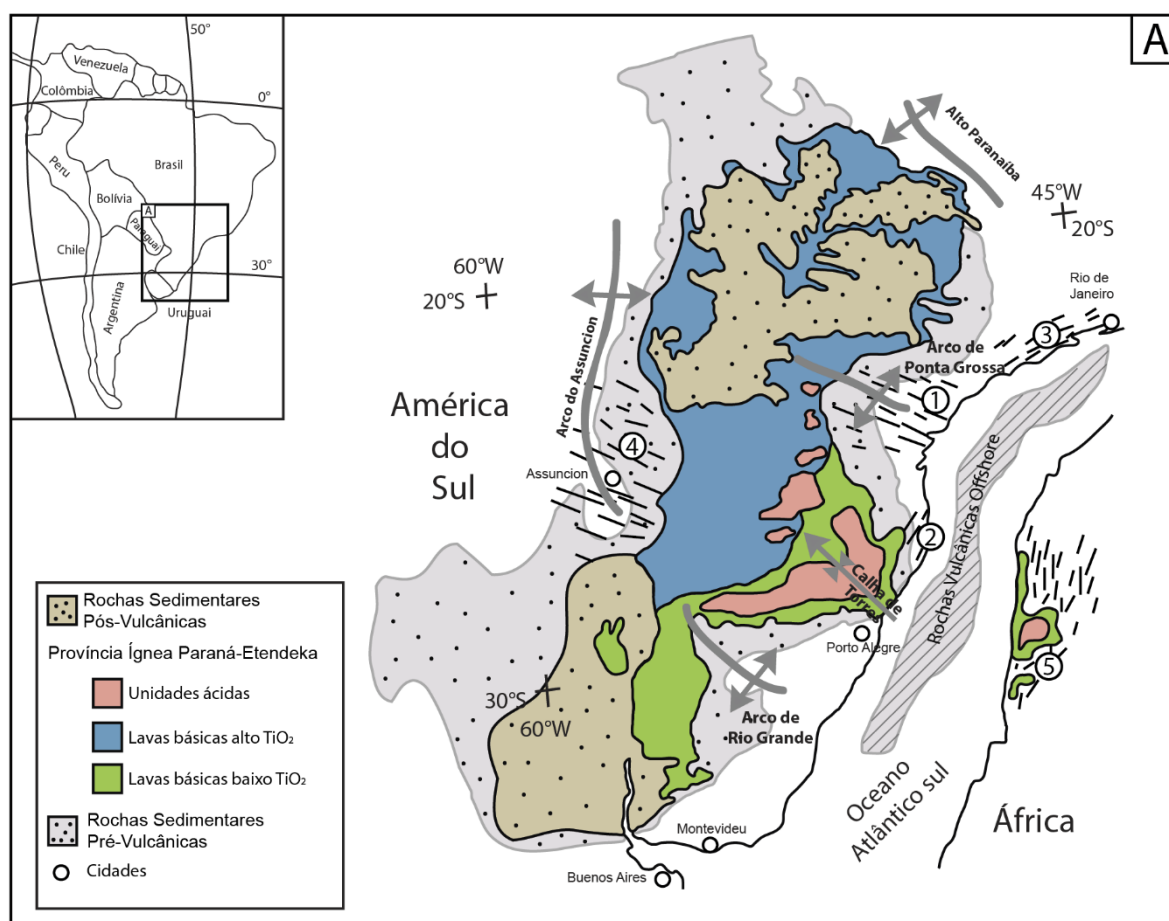


Figura 9 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas. Enxames de diques: 1 - Ponta Grossa; 2 - Florianópolis; 3 - Santos-Rio de Janeiro; 4 - Paraguai; 5 - Etendeka (Modificado de Rossetti *et al.*, 2018).

2.4 GRUPO SERRA GERAL

O vulcanismo Serra Geral foi amplamente estudado nas décadas de 1980 e 1990, com foco principalmente nas características geoquímicas, geocronológicas e paleomagnéticas (Bellieni *et al.*, 1984; Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997; Ernesto *et al.*, 1990). Recentemente, novos estudos com enfoque na arquitetura de fácies, aspectos morfológicos das lavas e características petrográficas foram aplicados para a construção de uma proposta estratigráfica formal. Rossetti *et al.* (2018) propuseram, para a porção sul da PIPE, a elevação da Formação Serra Geral ao *status* de Grupo Serra Geral e sua subdivisão em quatro formações: Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda. A proposta estratigráfica foi complementada por Horn *et al.* (2022) a partir dos mesmos critérios estratigráficos para as novas formações (Figura 10).

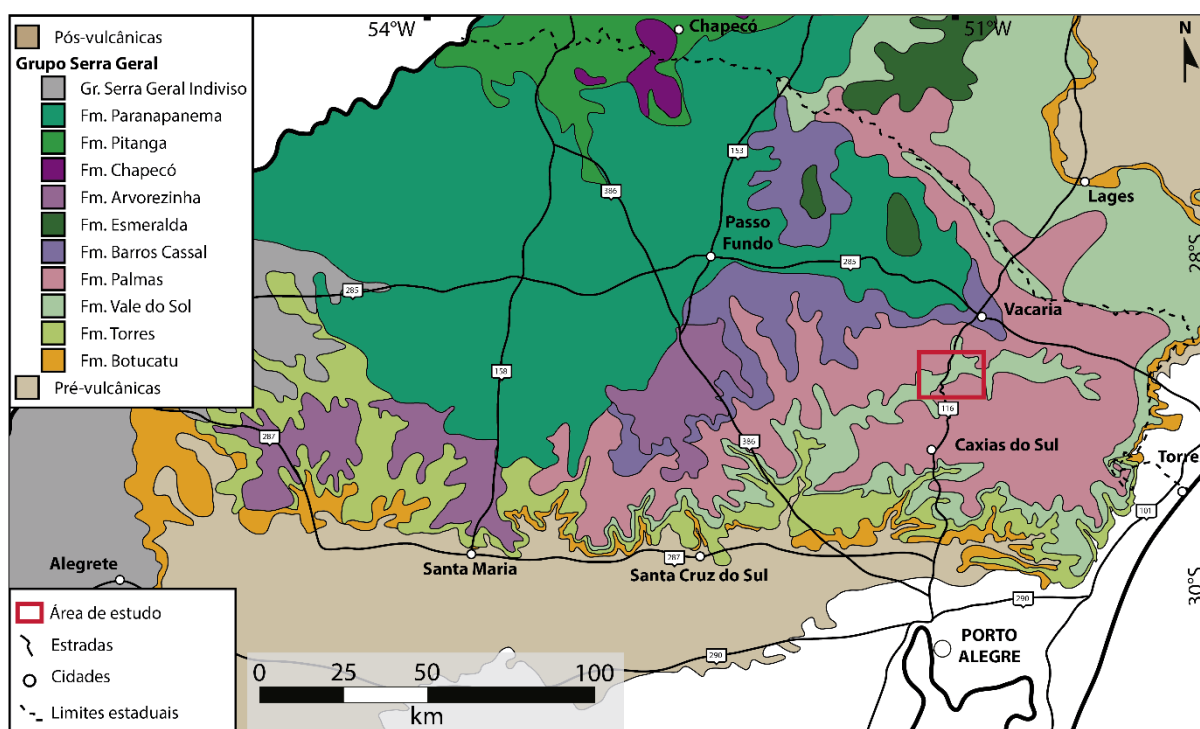


Figura 10 – Mapa geológico do Grupo Serra Geral na região norte do Rio Grande do Sul (Modificado de Horn *et al.*, 2022).

Na base do Grupo Serra Geral, a Formação Torres sucede os arenitos eólicos da Formação Botucatu e é caracterizada por basaltos do tipo *pahoehoe* compostos, apresentando morfologias de lobos de lava e lobos em lençol (Figura 11 – A) (Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2018). Os derrames possuem uma estrutura típica de *pahoehoe*, com crosta basal vesiculada (tipo *pipe*), núcleo maciço e crosta superior vesicular. Petrograficamente, os basaltos são de granulação média, contendo cristais

de olivina e plagioclásio, e apresentam textura porfírica a glomeroporfírica com plagioclásio, augita, óxidos de Fe e olivina (Rossetti *et al.*, 2018).

A Formação Vale do Sol é composta por derrames espessos (20-60 m) de andesitos basálticos do tipo *rubbly pahoehoe*, que podem ser estruturados em quatro partes: crosta inferior vesicular, núcleo maciço, crosta superior vesicular e superfície de topo brechada (tipo *rubbly*) (Figura 11 – B). Os andesitos basálticos apresentam textura afanítica a fanerítica fina, com augita e óxidos de Fe intergranulares, além de raros fenocristais de plagioclásio (Rossetti *et al.*, 2018).

A Formação Palmas é predominantemente composta por lavas de composição dacítica a riolítica, com morfologias de extensos derrames tabulares (*low aspect ratio*) com terminações lobadas, domos de lava e sistemas complexos de alimentação (Figura 11 – C) (Lima *et al.*, 2012, 2017; Rossetti *et al.*, 2018; Polo *et al.*, 2018). São comuns foliações de fluxo, dobras de fluxo, vesículas e megavesículas, além de autobrechas localizadas (Rossetti *et al.*, 2018; Simoes *et al.*, 2018). Petrograficamente, apresentam textura vitrofírica, com fenocristais de plagioclásio, augita e ortopiroxênio, sendo comum a presença de textura granofírica com intercrescimento de K-feldspato e quartzo. As foliações de fluxo são marcadas pela alternância de bandas com diferentes graus de cristalinidade e oxidação (Rossetti *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2023).

No topo, aflora a Formação Esmeralda constituída por basaltos do tipo *pahoehoe* compostos, semelhantes aos observados na Formação Torres. Apresentam a estrutura típica de lobos de lava, com crosta basal vesiculada, núcleo maciço e crosta superior vesicular (Figura 11 – A). Petrograficamente, possuem textura afírica a afanítica, com micrólitos de plagioclásio de forma acicular a esquelética, além de cristais de augita e óxidos de Fe imersos em uma matriz vítrea (Rossetti *et al.*, 2018).

As diferentes morfologias identificadas nas formações do Grupo Serra Geral podem ser associadas a diferentes estágios da atividade vulcânica (Cruz, 2019): **(1)** a Fm. Torres marca o início do vulcanismo com a colocação de lavas basálticas com baixas taxas de efusão; **(2)** a Fm. Vale do Sol representa o clímax vulcânico, caracterizado pelos derrames espessos do tipo *rubbly pahoehoe*; **(3)** a Fm. Palmas indica uma mudança composicional para lavas mais silicosas que se interdigitam com a Fm. Vale do Sol; **(4)** a Fm. Esmeralda marca o declínio do vulcanismo, composta por lavas basálticas do tipo *pahoehoe*, similar à Fm. Torres.

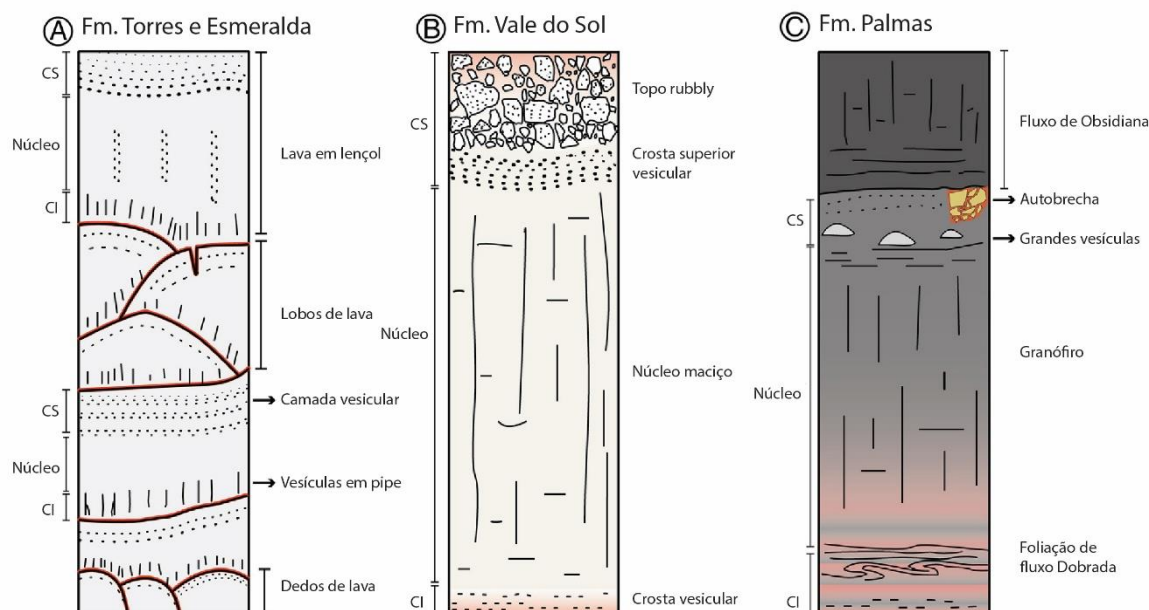


Figura 11 – Seção colunar de derrames das formações do Grupo Serra Geral. Abreviações: CS – Crosta Superior; CI – Crosta Inferior (traduzido de Rossetti *et al.*, 2018).

2.5 PADRÕES DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE DE ROCHAS VULCÂNICAS

O sistema permoporoso em rochas vulcânicas é complexo e heterogêneo, envolvendo uma variedade de processos primários e secundários que podem tanto criar quanto obstruir espaços porosos (Sruoga & Rubinstein, 2007). Uma análise abrangente dos tipos de poros primários e secundários, assim como dos processos formadores de porosidade em rochas vulcânicas, foi apresentada por Sruoga & Rubinstein (2007) (*Quadro 2*). O espaço poroso pode ser caracterizado como: (1) primário, relacionado à ascensão do magma e seu posicionamento na superfície; ou (2) secundário, formado por processos pós-*emplacment*, como alteração e fraturamento tectônico.

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>

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). Além disso, está associado às fraturas tectônicas e a precipitação de minerais secundários, que podem obstruir parcialmente ou totalmente a porosidade e permeabilidade. A Figura 12 apresenta alguns tipos comuns de padrões de porosidade em rochas vulcânicas.

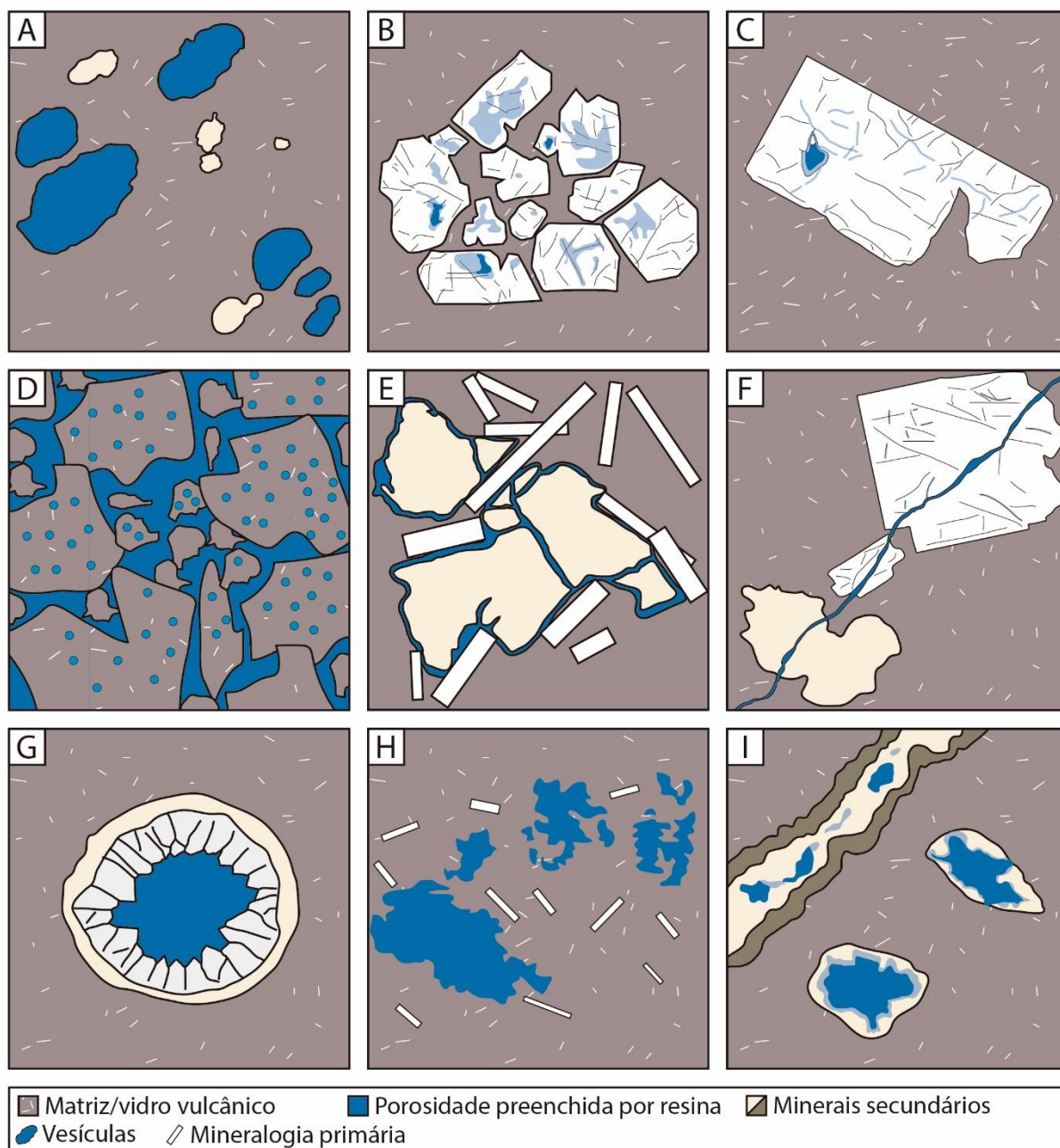


Figura 12 – Padrões de porosidade em rochas vulcânicas. A - Vesícula/Amigdalita; B - Dissolução de minerais primários; C - Fragmentação de minerais; D - Interclastos (autobrecha); E - Quenching; F - Fratura; G - Drusy; H - Dissolução da matriz; I - Dissolução de minerais secundários. (Fonte: autor)

2.5.1 Padrões de porosidade e permeabilidade do Grupo Serra Geral

Estudos sobre as características petrofísicas do Grupo Serra Geral são recentes (e.g., Becker *et al.*, 2019; Rossetti *et al.*, 2019; Navarro *et al.*, 2020). Esses dados são de grande importância, pois formam a base para pesquisas envolvendo sistemas aquíferos em rochas vulcânicas (e.g., Sistema Aquífero Serra Geral – Navarro *et al.*, 2020), análogos de reservatórios não-convencionais vulcânicos da margem continental brasileira (Reis *et al.*, 2014), e têm relevância para estudos de armazenamento geológico de CO₂ (Ketzer *et al.*, 2015; Pelissari *et al.*, 2023). Para

esses estudos, é essencial estabelecer uma base estratigráfica que permita a correlação com dados petrofísicos, como porosidade, permeabilidade e perfilagem geofísica (resistividade, velocidade de onda e raios gama).

Estudos na região norte do GSG (Navarro *et al.*, 2020) permitiram a identificação de quadro hidrofácies, a partir de perfilagem geofísica em poços, associando as zonas mais permeáveis aos topos dos derrames (vesicular, brecha e escória), alternados com intervalos de baixa permeabilidade representados pelos interiores dos fluxos (basalto maciço, colonados e de entablatura). Segundo Navarro (2020), foram identificados as seguintes hidrofácies com as suas respectivas características: **(1) núcleo de derrames**, basalto maciço com baixa porosidade e permeabilidade, mas alta resistividade ($>1.000 \Omega\text{m}$) e velocidade de propagação de ondas sísmicas (V_p) ($> 5 \text{ km/s}$); **(2) basalto vesiculado**, apresenta valores altos de raios gama (15,58 API), com resistividade média de $39,27 \Omega\text{m}$ e V_p de 3.9 km/s ; **(3) basalto alterado** possui resistividade média de $66 \Omega\text{m}$ e V_p média de 4.5 km/s , com raios gama de 25,64 API; **(4) lentes de argila**, representativas de antigas superfícies de alteração, apresentam intervalos anômalos nos perfis de raios gama devido à presença de argilominerais. O V_p é de $4,3 \text{ km/s}$, e a resistividade média é de $48,35 \Omega\text{m}$, similar às porções vesiculadas e alteradas.

No GSG, o sistema poroso apresenta alta heterogeneidade, resultante dos processos de colocação das lavas e da estruturação interna dos derrames (Becker *et al.*, 2019). Em geral, a crosta superior e inferior dos derrames basálticos possui porosidade mais alta ($>10\%$) e velocidade de ondas baixa, em contraste com os núcleos dos derrames, que apresentam baixa porosidade ($<5\%$) e alta velocidade de ondas (Rossetti *et al.*, 2019). Processos secundários desempenharam um papel importante na formação e obstrução da porosidade, contribuindo também pela baixa permeabilidade ($<1 \text{ mD}$) encontrada nestas rochas (Becker *et al.*, 2019; Rossetti *et al.*, 2019).

2.6 RESERVATÓRIOS VULCÂNICOS

O interesse da indústria e da academia em rochas vulcânicas tem crescido significativamente nos últimos anos. Esse interesse se deve à capacidade destes litotipos atuarem como reservatórios não-convencionais, tais como aquíferos e fontes de energia geotermal, mas especialmente na produção de hidrocarbonetos e, mais recentemente, no armazenamento de CO₂ (Figura 13) (Millett *et al.*, 2024).

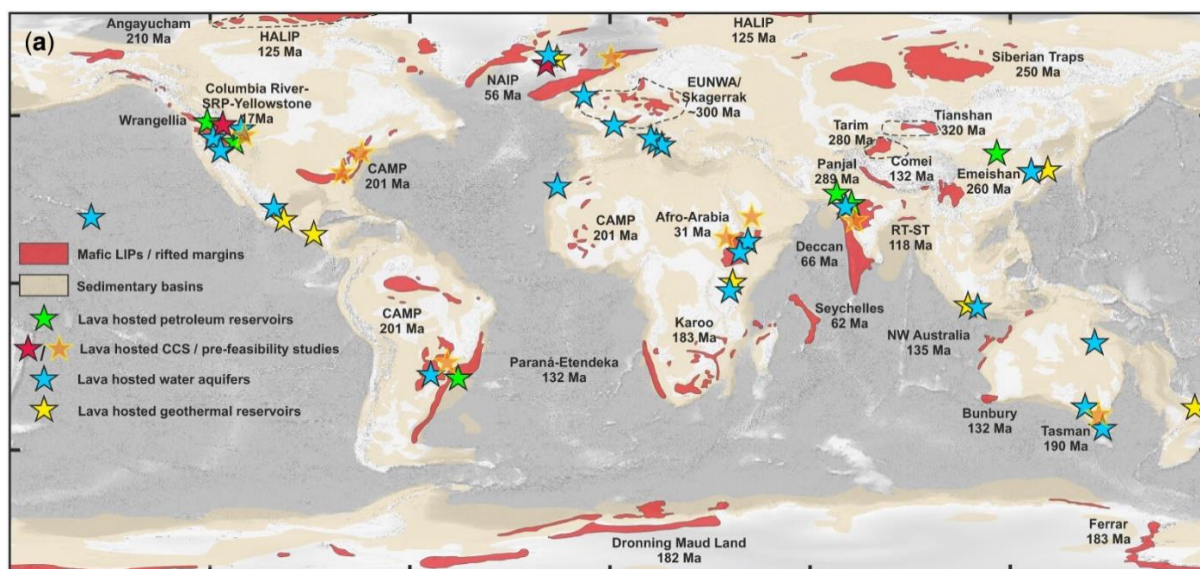


Figura 13 - Mapa global com a localização das principais LIPs e reservatórios vulcânicos associados (Millett *et al.*, 2024)

2.6.1 Reservatórios de hidrocarbonetos em rochas vulcânicas

As rochas ígneas em bacias vulcanossedimentares são frequentemente negligenciadas durante a exploração de hidrocarbonetos, principalmente devido à percepção de sua baixa qualidade como reservatório (Schutter, 2003), resultando em uma escassez de estudos detalhados sobre esses litotipos e suas interações com o sistema petrolífero. No entanto, o magmatismo e as rochas associadas podem desempenhar um papel complexo na evolução da bacia, potencialmente servindo como fontes de maturação da matéria orgânica, armadilhas e até mesmo como rochas reservatório.

Rochas ígneas, em especial vulcânicas, podem apresentar reservatórios comerciais de hidrocarbonetos, e são encontrados em diversos países ao redor do mundo, incluindo Brasil, Namíbia, Índia, China, Estados Unidos e Argentina (*e.g.*, Schutter, 2003; Zou *et al.*, 2013; Millett *et al.*, 2024). No Brasil, os campos de Badejo e Linguado, localizados na Bacia de Campos no *offshore* brasileiro, produziram hidrocarbonetos por mais de 30 anos a partir de reservatórios vulcânicos não-

convencionais na Formação Cabiúnas (Marins *et al.*, 2022). Esta formação consiste em uma intercalação de derrames básicos (*pahoehoe* compostos e *rubby pahoehoe*) com sedimentos siliciclásticos e rochas vulcanoclásticas, como peperitos e tufo (Mizusaki *et al.*, 1988, 1992; Marins *et al.*, 2022). Esse magmatismo está temporalmente associado à Província Ígnea Paraná-Etendeka, caracterizada por afinidade geoquímica toleítica com baixas concentrações de elementos incompatíveis e TiO_2 , possivelmente correlacionado aos estágios iniciais da fase de rifteamento (Mizusaki *et al.*, 1988).

O Grupo Serra Geral representa um excelente análogo para o estudo de sequências vulcânicas associadas a hidrocarbonetos nas bacias do *offshore* brasileiro (Reis *et al.*, 2014), como as Formações Cabiúnas e Camboriú (na Bacia de Campos e Santos, respectivamente). O estudo de análogos auxilia no entendimento das sequências *offshore*, devido à dificuldade de aquisição de dados diretos, pela elevada profundidade desses poços e o alto custo operacional.

2.6.2 Armazenamento de CO_2 em rochas vulcânicas

O aquecimento global e as mudanças climáticas têm provocado alterações substanciais nos sistemas ecológicos e ambientais em escala global (IPCC, 2007). A tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS - *carbon capture, utilization, and storage*) (IPCC, 2005) é considerada uma técnica essencial para o combate e mitigação das mudanças climáticas. Entre as técnicas de CCUS, o armazenamento geológico de CO_2 destaca-se pelo seu grande potencial para a fixação permanente do carbono na forma de minerais carbonáticos (Teir, 2008).

As rochas vulcânicas basálticas são candidatas excelentes para a mineralização de carbonatos devido à sua ampla distribuição global e grandes volumes (e.g., LIPs). Além disso, essas rochas básicas demonstram uma rápida e eficiente reatividade com o CO_2 (Gislason *et al.*, 2010; Matter *et al.*, 2016).

O processo de injeção de CO_2 pode ocorrer na forma pura (supercrítica) ou dissolvida em água (Kelektsoglou, 2018; Sanna *et al.*, 2014). Quando dissolvido em água, forma-se ácido carbônico, o que reduz o pH da água e aumenta sua reatividade (Matter *et al.*, 2009). O CO_2 reage quimicamente com os óxidos de Ca, Mg e Fe, resultando na formação de minerais carbonáticos estáveis, como calcita, dolomita, magnesita e siderita (Figura 14).

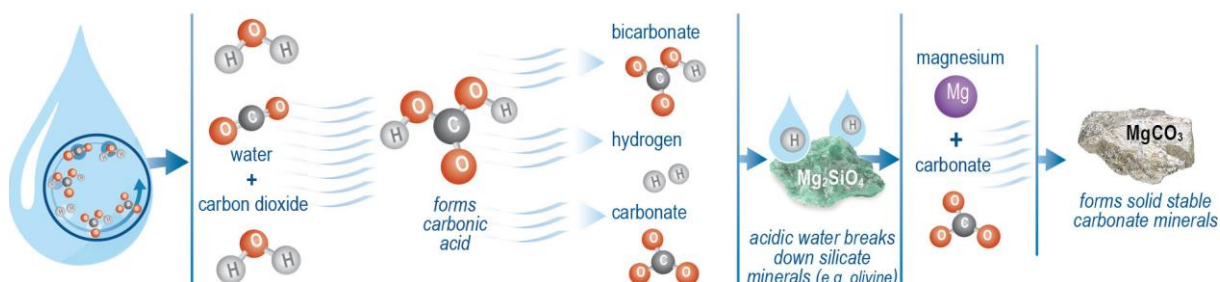


Figura 14 – Processo de mineralização de carbono em rochas basálticas com olivina (Sandalow *et al.*, 2021).

O CarbFix é um projeto piloto bem-sucedido de armazenamento de CO₂ em rochas basálticas na Islândia, com capacidade total estimada de 0,33 Gt de CO₂ (Callow *et al.*, 2018). Iniciado em 2012 nas proximidades da usina geotérmica de Hellisheidi, o projeto utilizou gás geotérmico contendo 83% de CO₂ e 16% de H₂S. O CO₂ foi misturado com a água subterrânea e injetado em derrames basálticos toleíticos com olivina e hialoclastitos a aproximadamente 500 metros de profundidade (Matter *et al.*, 2009). O projeto demonstrou alta eficiência, com mais de 95% do CO₂ mineralizado em dois anos (Snæbjörnsdóttir *et al.*, 2020). Após os resultados iniciais promissores, o projeto foi expandido em 2014, com a injeção de 23.000 toneladas adicionais de CO₂ em reservatórios a cerca de 750 metros de profundidade (Gunnarsson *et al.*, 2018), resultando na mineralização de aproximadamente 60% do CO₂ em três anos (Erol *et al.*, 2022).

Outro projeto piloto eficaz foi o de Wallula, em Washington, EUA, iniciado em 2009 e oficialmente lançado em 2013, que injetou cerca de 1000 toneladas de CO₂ supercrítico nos derrames basálticos do Columbia River (McGrail *et al.*, 2014; McGrail *et al.*, 2017). O CO₂ foi aquecido e pressurizado antes de ser injetado em zonas de basalto brechado, em derrames do tipo *rubbly pahoehoe*, a uma profundidade de 800 - 900 m. Após a conclusão da injeção, análises realizadas em testemunhos de sondagem revelaram uma rápida formação de ankerita em poros e fraturas dos basaltos (McGrail *et al.*, 2017; White *et al.*, 2020).

No Brasil, a Província Ígnea Paraná-Etendeka apresenta um alto potencial para armazenamento geológico de CO₂ (Ketzer *et al.*, 2015; Pelissari *et al.*, 2023), em especial nas regiões Sul e Sudeste, pela proximidade das fontes emissoras e da disponibilidade do basalto (Carneiro *et al.*, 2013). Estudos de reatividade nestes litotipos básicos apresentam uma rápida precipitação de carbonatos (aragonita-calcita e dolomita), especialmente em basaltos cristalinos, pela alta reatividade com minerais primários ricos em Ca, como plagioclásio e clinopiroxênio (Ferreira *et al.*, 2024).

CAPÍTULO III

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para obtenção e interpretação de dados durante a dissertação.

3 METODOLOGIA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de revisão bibliográfica consistiu na leitura de trabalhos sobre contexto geológico, estratigrafia vulcânica e morfologias de lavas, petrofísica e padrões de porosidade e permeabilidade em litotipos vulcânicos, e por fim reservatórios vulcânicos com foco em hidrocarbonetos e armazenamento geológico de CO₂.

3.2 ATIVIDADES DE CAMPO

Foram realizadas diversas campanhas de campo ao longo de 2021 até 2023, em parte complementares ao Trabalho de Conclusão de Curso do autor (Meucci, 2022). A atividade de campo envolveu a construção do arcabouço estratigráfico através do levantamento de 5 seções colunares em 3 perfis, conforme Quadro 3 e Figura 15. As litofácies foram descritas com base em 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 (Mcphie *et al.*, 1993). Além disso, foram coletadas amostras dos derrames para estudos petrográficos e petrofísicos.

Quadro 3 - Perfis e seções colunares utilizadas no trabalho com seus respectivos códigos. (Fonte: autor)

Perfil	Código do Perfil	Seção Colunar	Código da Seção
São Marcos – Campestre da Serra	SM - CS	São Marcos	SM
		Campestre da Serra	CS
Criúva – Campestre da Serra	CR - CS	Criúva	CR
		Campestre da Serra	CS
Cachoeira da Mulada	CM	Mulada	M

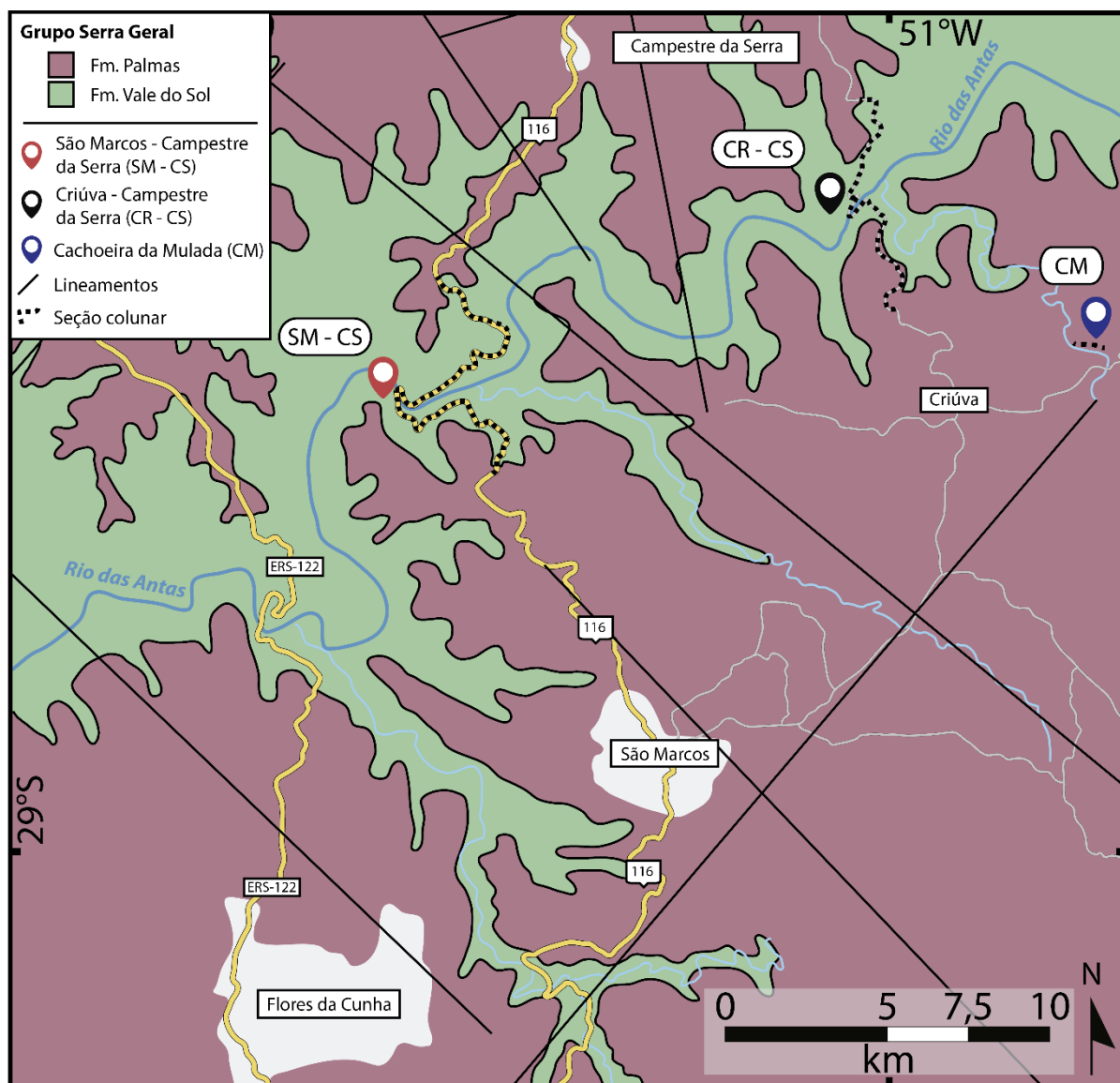


Figura 15 – Mapa geológico da área de estudo com a localização dos perfis colunares.

3.3 PETROGRAFIA

Foram selecionadas 32 amostras para a confecção de lâminas petrográficas com 30 µm de espessura e impregnadas com resina azul para ressaltar a porosidade e permeabilidade. A descrição petrográfica foi realizada com ênfase nas características qualitativas e seu principal foco foi classificar petrograficamente a rocha e definir os tipos de porosidade e permeabilidade.

3.4 ENSAIOS DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE

Foram selecionadas 21 amostras para o preparo de cilindros (*plugs*) de 1,5" e 1". Utilizou-se como critério de seleção o melhor controle estratigráfico e exposição dos derrames. Na seção colunar de São Marcos foram analisadas 12 amostras, representativas das porções de núcleo e topo de 6 derrames *rubblly pahoehoe*. Na seção colunar da Mulada foram analisadas 4 amostras de 2 derrames *rubblly pahoehoe*. Por fim no Perfil Criúva-Campestre da Serra (CR-CS), analisou-se 5 amostras, relacionadas a 3 litofácies de composição dacítica: dacito porfírico maciço (Dpm), dacito vesiculoso (Dv) e dacito vitrofírico porfírico (Dvtp). O Quadro 4 compila e organiza as informações apresentadas.

As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica e Petrofísica do IPR-PUCRS (Instituto de Petróleo e Recursos Naturais – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), utilizando-se o equipamento de Porosidade e Permeabilidade AP-608, que realiza medições do volume dos poros através da expansão do gás nitrogênio. Os ensaios consistem na medição das dimensões físicas da amostra, sendo executadas três repetições no equipamento para determinação da porosidade e permeabilidade efetiva das amostras para condições de 1000 PSI.

Quadro 4 – Compilação das amostras analisadas com a nomenclatura e a litofácies (Fonte: autor).

Perfil	Seção colunar	Amostra	Litofácies
Perfil SM-CS	São Marcos (SM)	VRA-3A	Bbr (Topo rubbly 8)
		VRA-3B	Bm (Núcleo rubbly 8)
		VRA-5A	Bbr (Topo rubbly 7)
		VRA-6A	Bm (Núcleo rubbly 7)
		VRA-11A	Bbr (Topo rubbly 4)
		VRA-11C	Bm (Núcleo rubbly 4)
		VRA-12A	Bbr (Topo rubbly 3)
		VRA-13A	Bm (Núcleo rubbly 3)
		VRA-14B	Bm (Núcleo rubbly 2)
		VRA-15A	Bbr (Topo rubbly 2)
		VRA-16A	Bbr (Topo rubbly 1)
		VRA-17A	Bm (Núcleo rubbly 1)
Perfil CM	Mulada (M)	M5.1A	Bm (Núcleo rubbly)
		M5.1C	Bbr (Topo rubbly)
		M9-B	Bbr (Topo rubbly)
		M9-C	Bm (Núcleo rubbly)
Perfil CR-CS	Criúva (CR)	M14-A	Dpm
		M22	Dvtp
		M34-B	Dv
	Campestre da Serra (CS)	M41	Dvtp
		M42	Dpm

3.5 TRATAMENTO DOS DADOS

Na etapa de tratamento de dados, as seções colunares foram vetorizadas através do programa Adobe Illustrator, assim como as ilustrações, litofácies e desenhos esquemáticos. As fotografias e microfotografias das diferentes litofácies e tipos de porosidades foram selecionadas e inseridas em *plates* de fotos no Adobe Illustrator. Os mapas foram confeccionados com o programa QGIS (versão 3.16), a partir da base cartográfica *Open Street Maps*, mapa geológico da Bacia do Paraná (2021) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e modelos digitais de elevação disponibilizados pelo TOPODATA (resolução do pixel 30 m).

CAPÍTULO IV

Neste capítulo são apresentados os resultados, discussões e conclusões do trabalho na forma de artigo científico intitulado de “STRATIGRAPHY AND PETROPHYSICAL PROPERTIES OF THE VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP: CASE STUDY IN ANTAS RIVER VALLEY REGION, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL”, publicado na *Journal of South American Earth Sciences*.

4 ARTIGO CIENTÍFICO



Marcelo Canals Meucci <marcelo.cmeucci@gmail.com>

SAMES-D-24-00450 - Confirming your submission to Journal of South American Earth Sciences

Journal of South American Earth Sciences <em@editorialmanager.com>

31 de julho de 2024 às
18:31

Responder a: Journal of South American Earth Sciences <support@elsevier.com>

Para: Marcelo Canals Meucci <marcelo.cmeucci@gmail.com>

This is an automated message.

Stratigraphy and petrophysical properties of the volcanic rocks of Serra Geral Group: case study in Antas River Valley region, Rio Grande do Sul, Brazil

Dear M.Sc. Meucci,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of South American Earth Sciences. It has been assigned the following manuscript number: **SAMES-D-24-00450**.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/sames/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of South American Earth Sciences

STRATIGRAPHY AND PETROPHYSICAL PROPERTIES OF THE VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP: CASE STUDY IN ANTAS RIVER VALLEY REGION, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL

Marcelo Canals Meucci^{1*}; Evandro Fernandes de Lima¹; Lucas de Magalhães May Rossetti²; Natália Gauer Pasqualon^{1,3}; Ingrid Muller Mohr¹; Gabriel Calzia Brose¹.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ²Universidade Federal de Mato Grosso; ³University of Hawai'i at Mānoa.

* corresponding author: Marcelo Canals Meucci (marcelo.cmeucci@gmail.com)

Abstract

Interest in volcanic rocks has grown significantly in recent years due to the capacity of these lithologies to function as unconventional reservoirs in hydrocarbon production and CO₂ storage. The investigation of the petrophysical properties of volcanic systems aims to better understand the capacity and efficiency of these lithotypes to store fluids and the conditions under which they can flow. However, the diversity of morphologies and lithofacies in volcanic successions generates complex permeable-porous structures, which causes a difficulty in analyzing and modeling for the construction of reservoir models. For a complete understanding, it is necessary to combine the study of petrophysical properties with detailed stratigraphic analysis. For this paper, the research was conducted through the study of five columnar sections, located in the Antas River Valley region, part of Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil. The stratigraphic framework was integrated with petrographic techniques and laboratory measurements of porosity, permeability and density for volcanic samples of Vale do Sol Formation and Palmas Formation (Serra Geral Group). The data obtained indicate that the petrophysical properties are highly controlled by lava internal structures and secondary processes. The highest porosities were found in the brecciated tops of rubbly lava flows (26.32%) and vesicular dacites (23.62%), mainly associated with vesicles, whereas interclast porosity types occur in autobreccias. Despite some high porosity values, the overall permeability is low (>1mD), however, this does not take into account the degree of fracturing observed in the field. The low porosity and permeability values are mainly associated with high presence of secondary minerals precipitated in the pores. These results demonstrate that the volcanic rocks in the Serra Geral Group have a complex pore system, due to primary and secondary processes, from magma ascent and emplacement on the surface to dissolution and precipitation of secondary minerals. Understanding the petrophysical properties and their association with lava morphologies is key for modelling volcanic

reservoirs and quantify the capacity of these lithotypes to store fluids, whether for hydrocarbon prospection or for geological CO₂ storage.

Keywords: Paraná-Etendeka; volcanic facies; petrophysical properties; volcanic reservoirs; unconventional reservoirs; carbon storage.

1. Introduction

Interest from both industry and academia in volcanic rocks has grown significantly in recent years. This interest arises from the capacity of these lithologies to function as unconventional reservoirs, such as aquifers and geothermal energy sources, but especially in hydrocarbon production and, more recently, in CO₂ storage (Millett et al., 2024). However, the diversity of morphologies and lithofacies in volcanic successions generates complex permeable-porous structures with different combinations of porosity and permeability patterns (Sruoga & Rubinstein, 2007). This scenario is further complicated by secondary processes, which act on pore filling and/or dissolution (Sruoga & Rubinstein, 2007).

The investigation of the petrophysical properties of volcanic systems aims to better understand the capacity of these lithotypes to store fluids and the conditions under which they can flow. The study of petrophysical properties, combined with detailed stratigraphic analysis, is crucial for modelling volcanic reservoirs and understanding their capacity and efficiency, whether for hydrocarbon prospection (e.g., Zou et al., 2013) or for geological CO₂ storage (e.g., CarbFix, Iceland - Matter et al., 2009; Wallula, USA - McGrail et al., 2014). Due to the complexity of volcanic system, analyzing volcanic successions requires a multi-step approach. The first step involves building a detailed stratigraphic framework, which includes the identification of flow morphologies and their internal structure, i.e., the distribution of lithofacies. The second step is the investigation of the petrophysical properties of these lithologies through the qualification and quantification of porosity and permeability, along with other methods such as ultrasonic acoustic velocities, bulk density, seismic, resistivity, and gamma rays (e.g., Fornero, 2018; Rossetti, 2019; Navarro, 2020). This methodology has been used to provide data and construct reservoir models for volcanic successions in various contexts, such as the Paraná-Etendeka Igneous Province (Rossetti et al., 2019), volcanic sequences in offshore settings (Marins et al., 2022), and potential CO₂ storage sites (Rosenqvist et al., 2023).

The aim of this paper is to establish the lithostratigraphic framework of a section of the Antas River Valley region, part of Paraná-Etendeka volcanism in southern Brazil (Figure 1-A), based on the identification, association and interpretation of lithofacies and the characterization of the petrophysical patterns of the lava flows. The present work describes in detail the upper portion of the Vale do Sol Formation and its transition towards silicic lavas of Palmas Formation. The lava internal structure and its

petrophysical properties are characterized and discussed, focusing on the different types of porosity and their relation to the lithofacies present in the lava flows. These results enhance the understanding of petrophysical patterns in volcanic system, useful for studies related to hydrocarbon production and CO₂ storage.

Lithostratigraphic studies in the Serra Geral Group (SGG) are recent (Waichel et al., 2012; Rossetti et al., 2014; Rossetti et al., 2018; Horn et al., 2022), as are works relating to the petrophysical characteristics of lava flows (e.g., Barreto et al., 2017; Rossetti et al., 2019; Becker et al., 2019). These data are of great importance because the SGG can be considered an analogue for the volcanism present in the basins of the Brazilian margin (Reis et al., 2014). The study of analogs aids in understanding offshore sequences due to the difficulty of acquiring direct data, the significant depth of these wells and the high operational costs. In addition to the hydrocarbon exploration potential, the studied region is part of the Serra Geral Aquifer System, and studying porosity and its relationship with the flows helps in understanding the flow and storage of groundwater in this aquifer (e.g., Navarro et al., 2020).

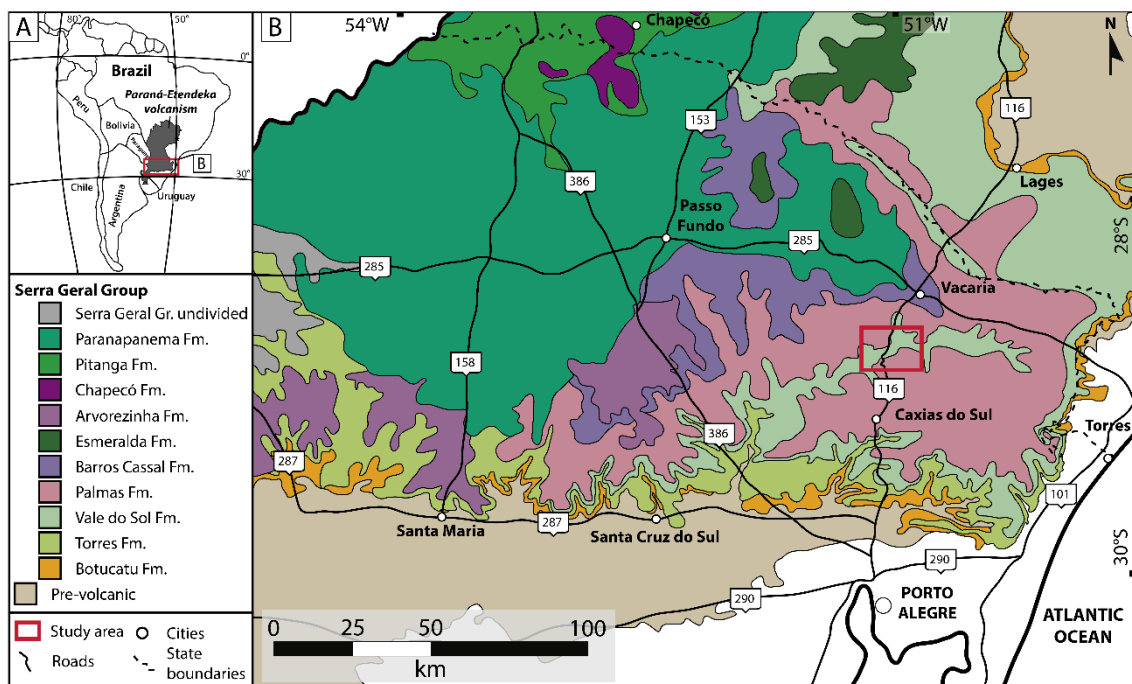


Figure 1 – Location of the study area in South America, southern Brazil. A – General location of Paraná-Etendeka volcanism in South America. B – Detailed geological map of the Serra Geral Group in the northern region of Rio Grande do Sul, southern Brazil. (modified after Horn et al., 2022).

2. Geological background

The Paraná-Etendeka Large Igneous Province (PELIP) is a Continental Flood Basalt Province, of the Early Cretaceous, which precedes the breakup of the supercontinent Gondwana and the opening of the South Atlantic Ocean (Gladczenko

et al., 1997). The magmatism has a tholeiitic affinity, dominated by subaerial lavas of basic composition, with subordinate acidic volcanics.

Most of PELIP is located in South America (90%), encompassing Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay; the remaining 10% is situated in southwestern Africa, in Namibia and Angola (Piccirillo & Melfi, 1988; Peate, 1997). In South America, the province covers an area of 917,000 km² and has an estimated volume of ca. 600,000 km³, considering both volcanic and intrusive rocks (Frank et al., 2009). It has an average thickness of 700 m, reaching up to 1725 m in the central portion of the Paraná Basin (Piccirillo & Melfi, 1988). The volcanic rocks of the PELIP exhibit rapid extrusion between 135.5 and 133.2 Ma, with the peak of magmatism lasting from 1.6 to 3 Ma (Gomes & Vasconcelos, 2021). The acidic rocks of the province are younger, with ages between 133.6 Ma and 132.9 Ma (Rocha et al., 2020).

The Paraná-Etendeka volcanism was extensively studied in the 1980s and 1990s, mainly focusing on geochemical, geochronological and paleomagnetic characteristics (Bellieni et al., 1984; Peate et al., 1992; Peate, 1997; Ernesto et al., 1990). Geochemically, the province can be divided into a southern portion characterized by low Ti/Y (<310) (Peate et al., 1992; 1997), including the basic Gramado and Esmeralda magmas types, as well as the acidic rocks of the Palmas type (Mantovani et al., 1985; Peate et al., 1992). The northern portion, on the other hand, is characterized by high Ti/Y (>310), composed of basalts of the Ribeira, Pitanga and Paranapanema types, the acidic rocks of the Chapecó type (Peate et al., 1997).

Recently, Rossetti et al. (2018) proposed the elevation of the Serra Geral Formation to the status of the Serra Geral Group in the southern portion of the PELIP (Figure 1-B), and its subdivision into four formations: Torres, Vale do Sol, Palmas and Esmeralda. The stratigraphic proposal was further developed by Horn et al. (2022), using the same stratigraphic criteria. They included the Botucatu Formation at the base of the Serra Geral Group and defined several new formations: Barros Cassal, Arvorezinha, Jaguarão, Chapecó, Pitanga and Paranapanema.

Two main formations can be identified in the Antas River Valley region: the Vale do Sol Formation, which is overlaid by the Palmas Formation. The contact is established regionally at approximately 650 m above sea level. The Vale do Sol Formation (VSF) is composed of thick basaltic andesites lava flows (20 - 60 m) of rubbly pahoehoe. These flows can be structured into four parts: vesicular lower crust, massive core, vesicular upper crust and a rubbly flow top. The basaltic andesites

exhibit aphanitic to fine-grained holocrystalline textures, with augite, plagioclase and Fe oxides, and rare plagioclase phenocrysts (Rossetti et al., 2018).

The Palmas Formation is predominantly composed of dacitic to rhyolitic lavas, with extensive tabular morphologies (low aspect ratio) with lobate terminations, silicic lava domes and complex feeding systems (Lima et al., 2012, 2017; Rossetti et al., 2018; Polo et al., 2018). Common features include flow foliations and folds, vesicles and megavesicles, as well as localized autobreccias (Rossetti et al., 2018; Simoes et al., 2018). Petrologically, they display a vitrophyric texture with plagioclase, augite and orthopyroxene phenocrysts. Granophyric texture with intergrowth of K-feldspar and quartz is also common. Flow foliations are marked by alternating millimetric bands with varying degrees of crystallinity and oxidation (Rossetti et al., 2018; Simões et al., 2023).

3. Methodology

3.1 Fieldwork and stratigraphic logs

Fieldwork for this study was conducted on the Antas River Valley, northeast region of Rio Grande do Sul state, Brazil. The lithofacies were described based on a code of at least two letters, adapted for volcanic rocks (McPhie et al., 1993), where the uppercase letter corresponds to lithological composition and the lowercase letter refers to structural and/or textural aspects, e.g., massive basalt (mB). Lithofacies were associated for the interpretation of eruptive styles/emplacement conditions.

The stratigraphic analysis was conducted through the study of five columnar sections at a 1:1000 scale, along three profiles located in the Antas River Valley region (Figure 2): (1) São Marcos – Campestre da Serra profile is situated along BR-116 road between Km 88 and Km 103, ranging from ca. 300 to 650 m above sea level (350 m of vertical log succession); (2) Criúva – Campestre da Serra profile is located on a local road between the districts of Criúva (Caxias do Sul) and São Manoel (Campestre da Serra), ranging from ca. 325 to 850 meters above sea level (525 meters of vertical log succession); (3) Cachoeira da Mulada profile is located at Reserva Bertussi, in the Criúva district, ranging from ca. 575 to 725 meters above sea level (150 meters of vertical log succession).

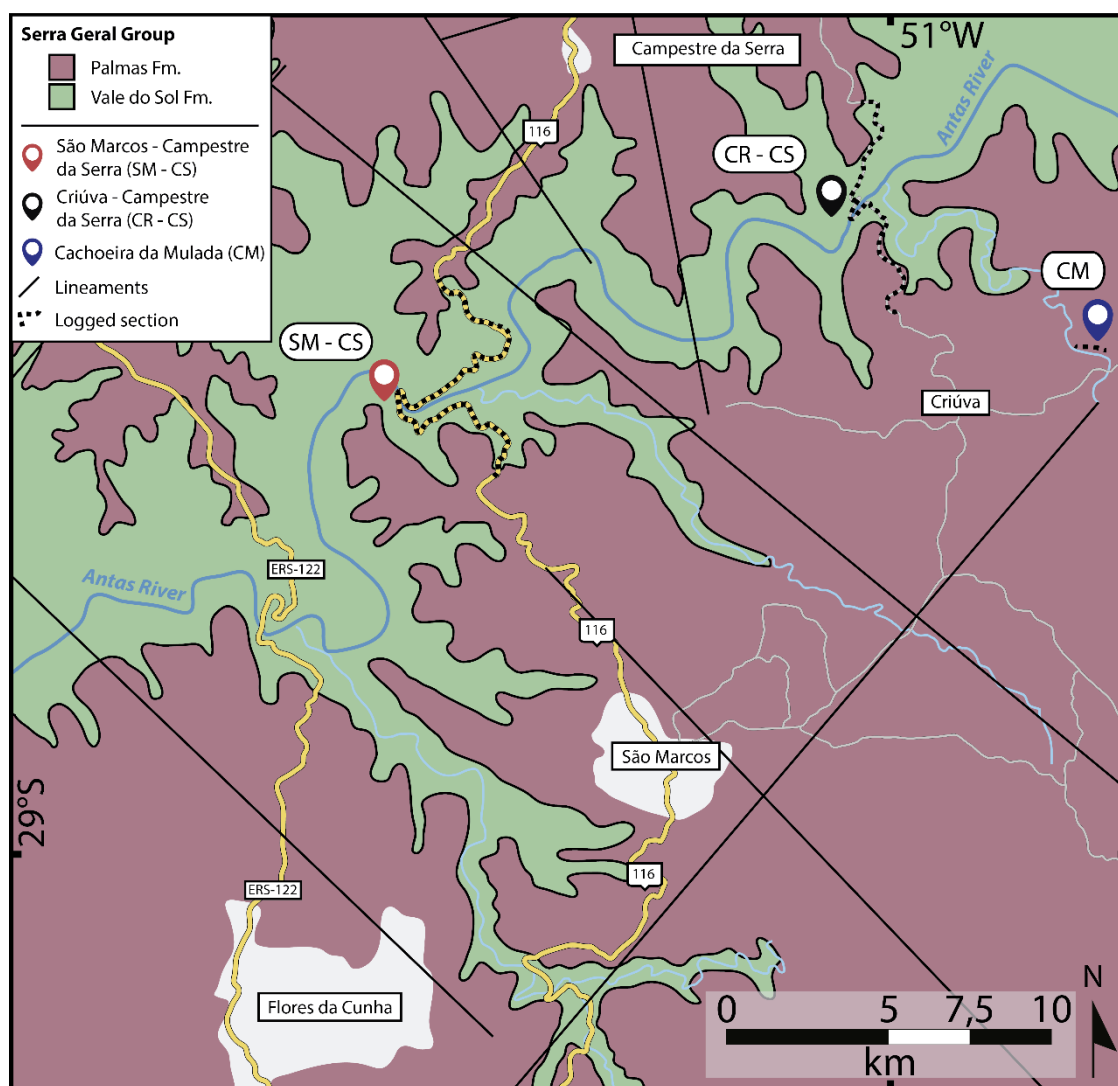


Figure 2 – Geological map of the studied area with the logged sections locations.

3.2 Petrophysical analysis

Thirty-two samples were selected for this study, distributed across three logged sections through the Serra Geral Group (locations shown in Figure 2). The samples were analyzed using petrographic techniques on resin-impregnated samples, with an emphasis on qualitative characteristics, such as rock classification and pore types. Additionally, twenty-one core plugs were selected for quantitative analysis of the permo-porous space, which was conducted by measuring the pore volume using nitrogen gas expansion under conditions of 1000 PSI, at the Geochemistry and Petrophysics Laboratory at the IPR-PUCRS (Institute of Petroleum and Natural Resources – Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil). For the quantitative analysis, twelve samples from the São Marcos – Campestre da Serra logged section were analyzed, representing the core and top portions of six rubbly pahoehoe basaltic flows. In the Cachoeira da Mulada section, four samples from two

rubbly pahoehoe basaltic flows were analyzed. Finally, in the Criúva – Campestre da Serra profile, five samples of dacitic composition were analyzed.

4. Results

The results are segmented into (1) stratigraphic analysis, based on the identification and association of lithofacies, and (2) petrophysical patterns, in which each lithofacies is described petrographically, with the characterization and quantification of permoporosity. Overall, 10 lithofacies were identified and three lithofacies association were described (detail description in Appendix A), with porosity varying from 0,28% to 26,32% with dominant vesicular porosity type.

4.1 Stratigraphy

4.1.1 São Marcos – Campestre da Serra section

In the São Marcos – Campestre da Serra section (SM – CS) (Figure 3), the Vale do Sol Formation (VSF) was identified, comprising eight to thirteen rubbly pahoehoe lava flows, between elevations 290 and 635 m, with an average total thickness of 345 m. The lava flows have an average thickness of 25 to 30 m, reaching up to 50 m, particularly in the southern portion of the profile (São Marcos). The lava flows feature the typical rubbly pahoehoe division (Guilbaud et al., 2005; Duraiswami et al., 2008): the core of the lava flow, composed by a massive texture (mB – massive Basalt) with columnar jointing (when thicker) and entablatures (usually at the base); a dense vesicular zone (vB – vesicular Basalt), located above the core and below the breccia; and the upper portion composed of rubbly autobreccias (bB – brecciated Basalt). This lithofacies when associated reveal rubbly pahoehoe flows of simple tabular morphology. Common vesicular characteristics at the base were not observed for these lava flows. Additionally, not all lava flows exhibited vesicular zones; locally, vesicular fragments were observed embedded in the massive internal portion. At the base of the volcanic pile, a brecciated zone filled with sandstone was identified (bBs).

In the upper portion of the profile (elevations 650 and 665 m), acidic flows and rare feeder conduits associated with the Palmas Formation (PF) were identified. These flows have low exposure due to the degree of alteration, are thin (6 m), and have a simple tabular morphology, aphanitic texture, and horizontal flow foliation structures marked by alternating millimetric bands with varying degrees of crystallinity and oxidation (haD). The conduits exhibit the same characteristics, with an aphanitic texture and band alternation, but in a subvertical structure (saD), with common autobreccias and flow-stretched fragments.

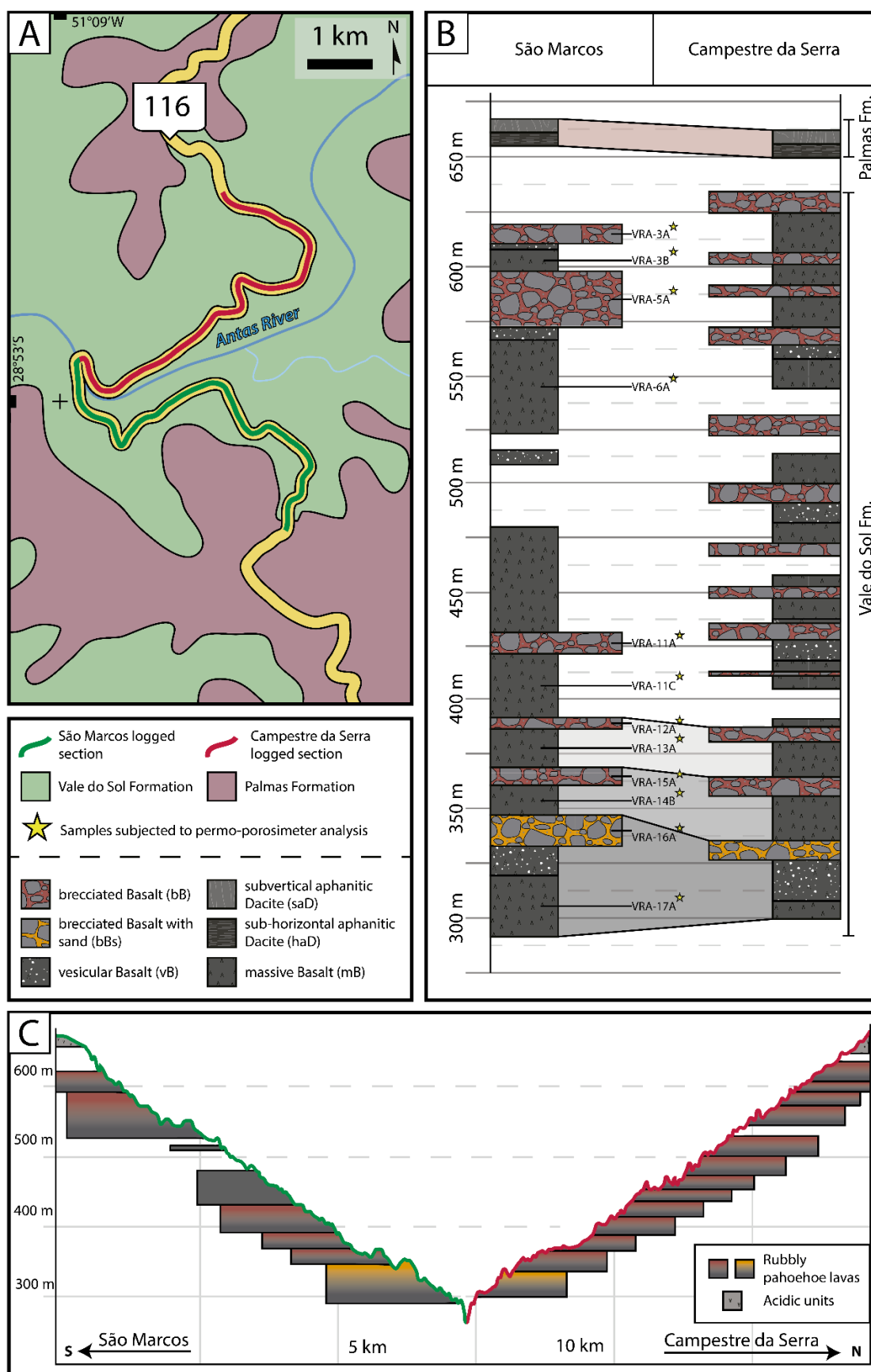


Figure 3 – São Marcos – Campestre da Serra logged section. A – Geological map and profile location; B – Vertical log succession with lateral correlation and sample locations indicated; C – Simplified distribution of lava flows along SM – CS profile.

4.1.2 Criúva – Campestre da Serra section

In the Criúva – Campestre da Serra section (CR – CS) (Figure 4), between four to five rubbly pahoehoe basaltic flows were identified at the base of the profile, related to the VSF, with an average thickness of 15 to 25 m. In the intermediate portion of the profile, between 450 - 500 to 600 m, two dacitic flows from PF were observed, characterized by a very thick core (on average 40 m) with granophyric texture (gpD – granophyric porphyritic Dacite) and an upper vitrophyric crust (vtpD – vitrophyric porphyritic Dacite). At 600 m, a very distinctive lithofacies was observed of zeolitized vesicular dacite (zvD), with a greenish color, correlated across both sides of the profile. The unit above these acidic lava flows is characterized by thin rubbly pahoehoe basaltic flows. In the upper portion of the profile, several acidic units are identified ranging from granophyric (gpD) and vitrophyric (vtpD) dacitic flows to tabular flows with flow structures (haD) featuring lobate terminations and marked by vesicular dacite (vD).

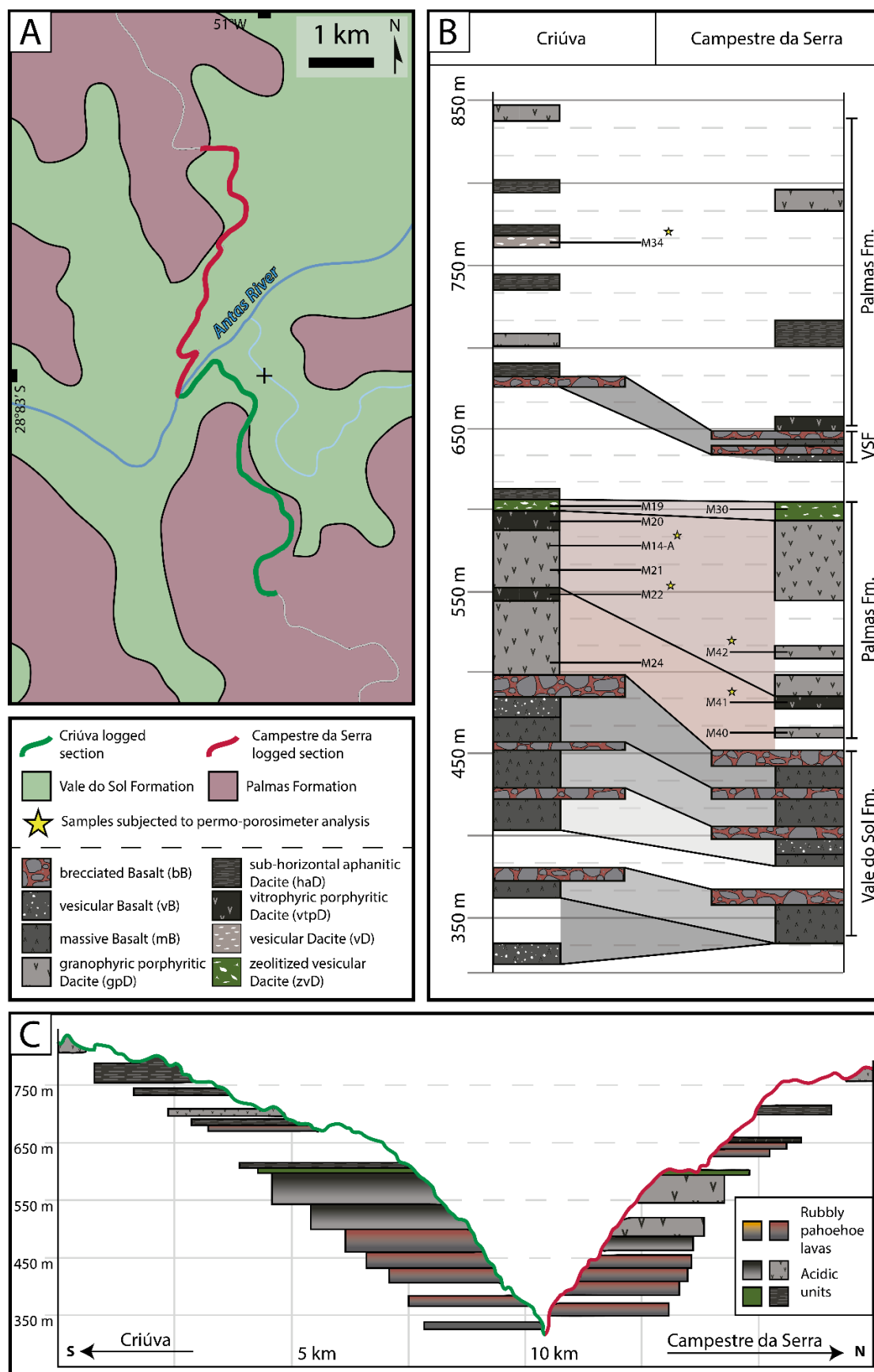


Figure 4 - Criúva – Campestre da Serra logged section. A – Geological map and profile location; B – Vertical log succession with lateral correlation and sample locations indicated; C – Simplified distribution of lava flows along CR – CS profile.

4.1.3 Cachoeira da Mulada section

In the Cachoeira da Mulada section (CM) (Figure 5), three rubbly pahoehoe basaltic flows were identified between elevations 585 and 660 m, with a total thickness of 75 m, representing the VSF. The flows have thicknesses ranging from 15 to 50 m. Their morphology is similar to that described in the SM – CS section, with brecciated tops (bB) ranging from 5 to 15 m thick, massive cores (mB) between 5 to 35 m thick, and vesiculated portions (vB).

In the upper portion of the lava pile (elevations 670 and 725 m), acidic lava flows and feeder conduits from the PF were identified. These flows exhibit the same characteristics as the ones previously described: simple tabular morphology, aphanitic texture, and horizontal flow foliation structures (haD). The conduits are aphanitic with flow foliations, and the top features display tight flow folds (saD). At the waterfall, a prominent lineament was observed, controlling the water path and possibly indicating the contact between lithologies. This aspect will be further investigated to understand the local tectonic characteristics.

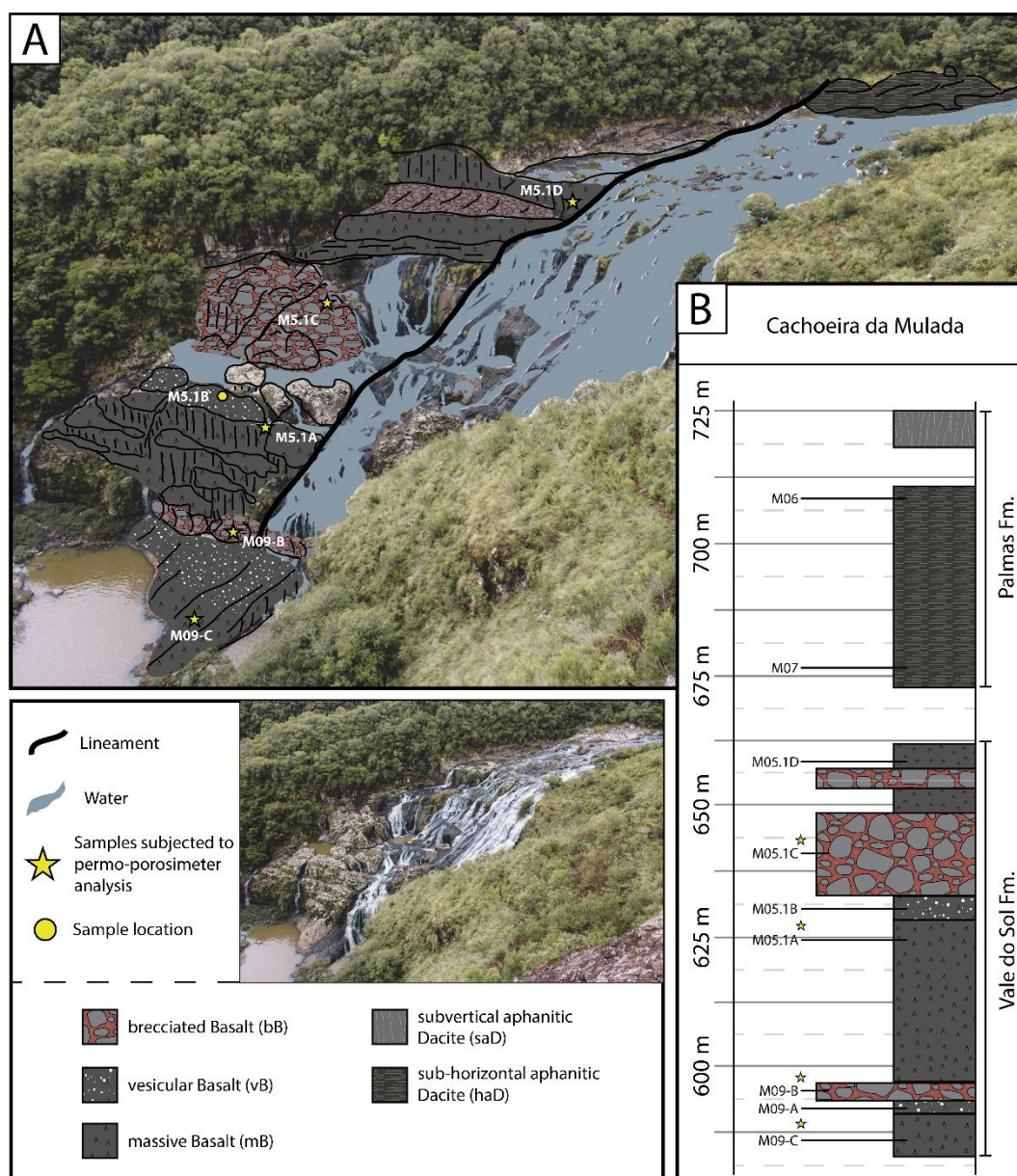


Figure 5 – Cachoeira da Mulada logged section. A – Schematic drawing of lava flows in Cachoeira da Mulada; B – Vertical log succession with sample locations indicated.

4.2 Petrography

Petrographically, the basaltic lithofacies generally exhibit an aphanitic texture with plagioclase and pyroxene microphenocrysts, along with the presence of iron oxides and rare plagioclase phenocrysts. The matrix consists of highly oxidized glassy material altered to clay minerals and zeolites. The massive lithofacies (mB) is characterized by a more crystalline, fine-grained holocrystalline texture and rarely contains vesicles and amygdalae (Figure 6-A). It also exhibits a diktytaxitic texture filled with zeolites and clay minerals (Figure 6-B). In the vesicular portion (vB) (Figure 6-C), the facies show similar textures as mB but with a higher quantity of vesicles and amygdalae, with oval to irregular morphology, ranging from 0.1 – 1 mm. The brecciated

lithofacies (bB) has a characteristic reddish color due to lava oxidation, composed of vesicular to amygdaloidal volcanic fragments, with infill between fragments that can be volcanic (from the flow itself) or secondary minerals (such as zeolites) (Figure 6-D). Locally, at the lower part of the SM – CS profile, a portion of breccia filled with sandstone (bBs) was identified. The types of porosity identified in the rubbly pahoehoe flows consists of vesicles, primary/secondary mineral dissolution, diktytaxitic, matrix dissolution, fractures, crystal fragmentation, interclast (Figure 6-E), and drusy (Figure 6-F).

The dacitic lithofacies are associated with lava flows and feeder conduits. Petrographically, the lithofacies show horizontal (haD) or subvertical (saD) flow structures, marked by alternating devitrified bands and bands with high oxide content. The porphyritic texture exhibits plagioclase and orthopyroxene phenocrysts (Figure 6-G). The matrix is aphanitic with plagioclase microlites and can be vitrophyric (vtpD) or granophyric (gpD) when devitrified. The presence of vesicles and amygdales in the acidic lithofacies is rare, except in the vesicular lithofacies (vD), and existing pores are commonly associated with primary mineral dissolution (Figure 6-H) and fracturing.

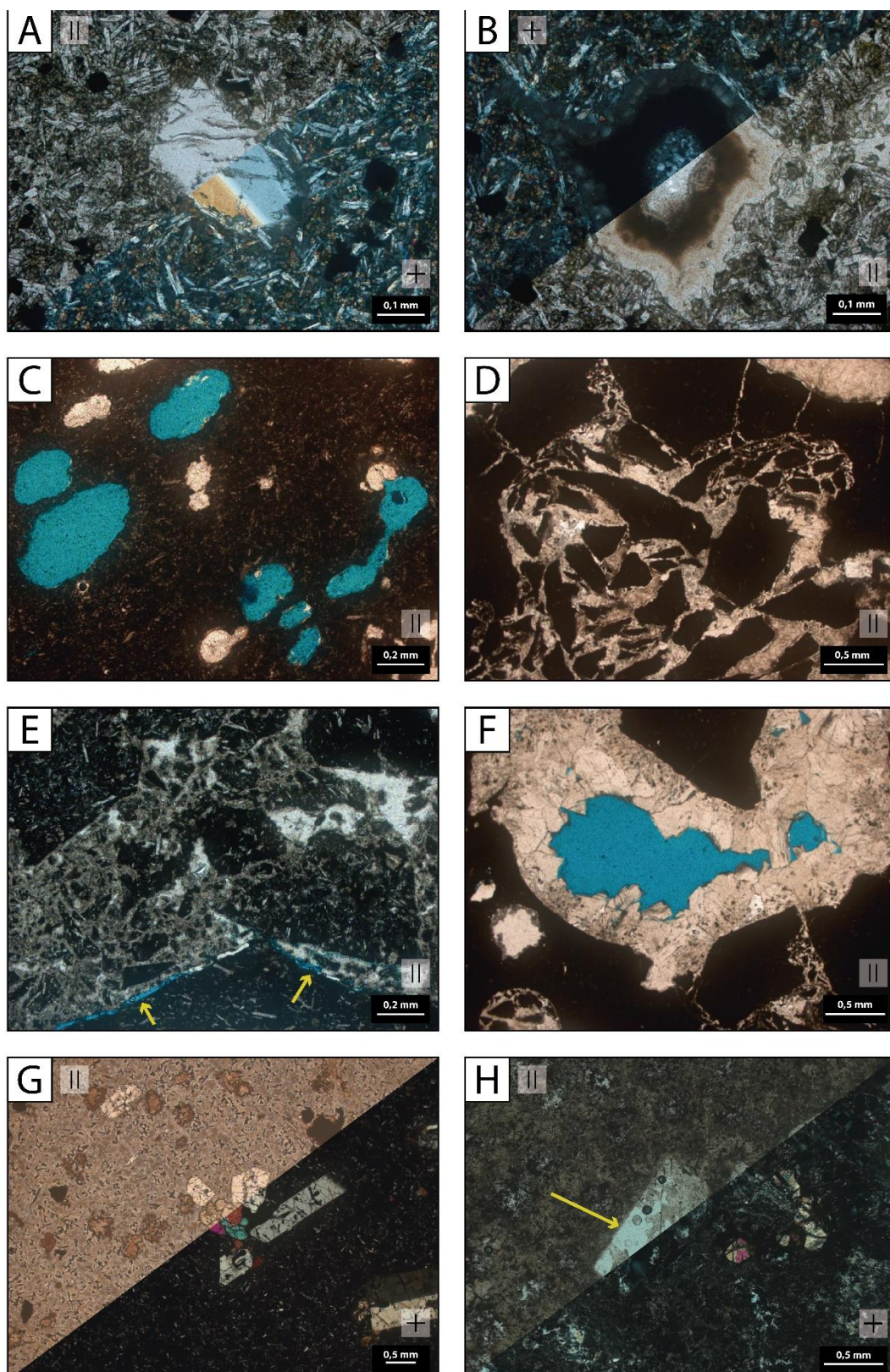


Figure 6 – Photomicrographs of textural aspects, primary and secondary mineralogy, and pore types. A – Plagioclase microphenocryst in a holocrystalline matrix of plagioclase and pyroxene in a massive basalt; B – Irregular intercrystalline pore filled with zeolite, clay minerals, and chalcedony; C – Vesicular basalt with preserved porosity and zeolite-filled pores; D – Oxidized fragment of a brecciated rubbly pahoehoe top, with interclast space filled by zeolites; E – Basaltic breccia with both interclast porosity and interclasts filled by zeolite and clay minerals; F – Drusy-type porosity with partial zeolite filling in basaltic breccia; G – Porphyritic texture with plagioclase and pyroxene phenocrysts in vitrophyric dacite; H – Partially dissolved plagioclase phenocryst in granophyric dacite. II – Parallel polarizers; + – Perpendicular polarizers.

4.3 Petrophysical properties

The petrophysical properties in volcanic rocks are complex and heterogeneous, involving a variety of primary and secondary processes that can both create and obstruct pore spaces (Sruoga and Rubinstein, 2007). Primary porosity is related to processes from pre-emplacement (magma ascent) to the final cooling of the lava as a closed-system, while secondary porosity is associated with post-emplacement processes in open-system conditions, such as alteration, metamorphism, and tectonic deformation (Petford, 2003; Sruoga and Rubinstein, 2007). Primary porosity can include vesicular (gas release), intracrystalline or moldic (deuteric dissolution), interclast (autobreccias) and fracture (cooling and quenching) types. Secondary processes are related to alterations (diagenetic reactions, weathering and hydrothermal) and fracturing. These processes modify or create pores through the dissolution of primary minerals (intracrystalline, moldic or matrix) and the dissolution of lava fragments in an autoclastic setting (intra and interclasts). Additionally, the volcanic rocks can be associated with tectonic fractures and the precipitation of secondary minerals, which can partially or completely obstruct porosity and permeability.

Overall, in the samples studied, eight different types of porosity were identified: vesicles, primary/secondary mineral dissolution, matrix dissolution, fractures, crystal fragmentation, interclast and drusy. Figure 7 illustrates some types of porosity patterns found in the samples of this study, as well as some common porosity types in volcanic rocks. For the rubbly pahoehoe lavas, the most common type was vesicles and interclast porosity. For the acidic lava flows, dissolution and fragmentation of primary minerals porosity types were more common.

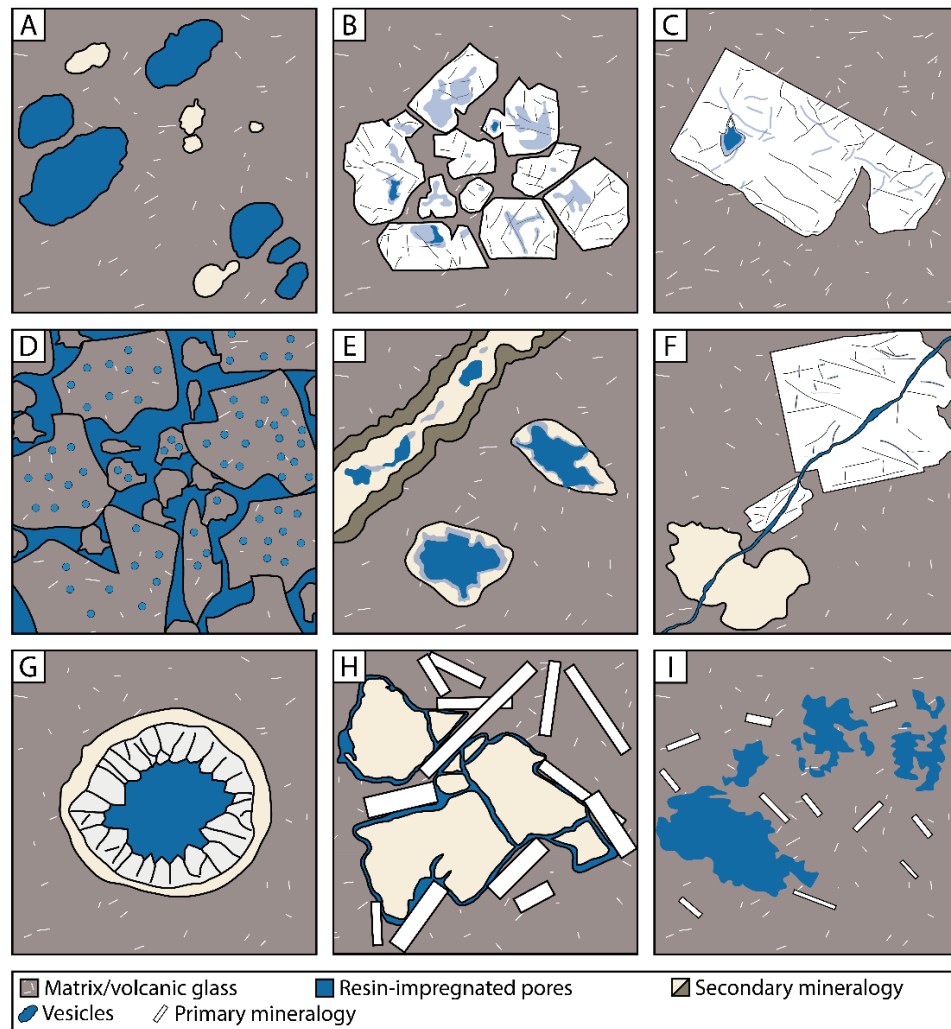


Figure 7 – Porosity types in volcanic rocks (based on the samples of this study, except illustration H (Barreto et al., 2017) and I (Becker et al., 2019); the scale is not represented for illustration purpose). A – Vesicle; B – Primary mineral dissolution; C – Mineral fragmentation; D – Interclasts (autobreccia); E – Secondary mineral dissolution; F – Fracture; G – Drusy; H – Quenching; I – Matrix dissolution.

The highest porosities are found in the brecciated zones of the rubbly pahoehoe flows from VSF (bB and bBs), with the measured present-day porosities ranging from 0.91% to 26.32% (Table 1), with an average of ca. 9.07%. The internal portion of the flows (mB) varies from 0.28% to 2.57% (Table 1), with an average of ca. 1.09%. Permeability in the basaltic lithofacies is very low, from 0 mD in the flow cores, and between 0 mD and 0.17 mD in the brecciated zones (with an average of ca. 0.05 mD). For the acidic flows of the PF, the vitrophyric external crust (vtpD) shows slightly higher porosity values (2.99%) compared to the granophyric internal portion (gpD) of the lava flows (average of ca. 0.86%) (Table 1). Regarding permeability, the values are extremely low, ranging from 0 mD to 0.02 mD. The vesicular portion of the flows (vD) presents high porosity (23.62%), as well as higher permeability (0.19 mD) compared to the other volcanic samples in this study (Table 1).

Densities are lower in the more porous samples, ranging from 2.07 g/cm³ in the vesicular dacite to 2.3 g/cm³ in the rubbly flow top samples. The acidic lithofacies have an average density of 2.47 g/cm³, while the massive basalts in the core of the lava flows have an average density of 2.88 g/cm³.

Table 1 – Porosity, permeability and density measurements from the volcanic rocks samples used in this study.

Logged section	Sample	Stratigraphic Unit	Lithofacies	Porosity (%)	Permeability (mD)	Density (g/cm ³)
SM-CS	VRA-3A	VSF	bB	1.24	0.00	2.58
	VRA-3B	VSF	mB	1.02	0.00	3.05
	VRA-5A	VSF	bB	11.33	0.02	2.24
	VRA-6A	VSF	mB	0.59	0.00	2.79
	VRA-11A	VSF	bB	6.94	0.13	2.24
	VRA-11C	VSF	mB	1.25	0.00	2.78
	VRA-12A	VSF	bB	3.81	0.00	2.20
	VRA-13A	VSF	mB	0.28	0.00	2.86
	VRA-15A	VSF	bB	12.39	0.07	2.18
	VRA-14B	VSF	mB	2.57	0.00	3.03
	VRA-16A	VSF	bBs	0.91	0.00	2.49
	VRA-17A	VSF	mB	0.62	0.00	2.88
CM	M5.1A	VSF	mB	1.69	0.00	2.90
	M5.1C	VSF	bB	9.58	0.03	2.41
	M9-B	VSF	bB	26.32	0.17	2.07
	M9-C	VSF	mB	0.69	0.00	2.77
	M14-A	PF	gpD	0.29	0.00	2.40
	M22	PF	vtpD	2.99	0.02	2.42
CR-CS	M34-B	PF	vD	23.62	0.19	2.07
	M41	PF	vtpD	2.99	0.00	2.56
	M42	PF	gpD	1.43	0.00	2.50

5. Discussion

The petrophysical properties in volcanic rocks is complex and heterogeneous due to primary and secondary processes, from magma ascent and emplacement on the surface to dissolution and precipitation of secondary minerals (Sruoga and Rubinstein, 2007). The lithofacies represent different parts of lava flows, each with their own petrophysical characteristics, revealing patterns that can be identified in the field and even in well logs (Rossetti et al., 2019; Oliveira et al., 2024).

Most of the samples studied in this work are related to the brecciated top and the massive flow core of rubbly pahoehoe lavas, with some samples also related to acidic lava flows, including internal and external portions, as well as vesicular lithofacies. Generally, the highest porosity values are found in the brecciated flow-top of rubbly pahoehoe samples, particularly in sample VRA-5A (11.33%), VRA-15A

(12.39%) and M9-B (26.32%), with the exception of sample M34-B, a vesicular dacite with 23.62% porosity (Table 1), possibly associated with outer portions of the lava flow (e.g., Besser et al., 2018; Simões et al., 2018). Such high values in breccias are common, despite the high variability (0.91% to 26.32%), and have been observed in studies of the Vale do Sol Formation (Barreto et al., 2017; Becker et al., 2019; Rossetti et al., 2019), as well as in other volcanic areas (Zou, 2013; Couves et al., 2016; Marins et al., 2024). Vesicular lithofacies in acidic lavas, though less common, can be found associated with the external portions of lava flows, typically stretched and filled with zeolite and clay minerals (Furukawa and Uno, 2015; Besser et al., 2018; Simões et al., 2018). The different porosity patterns between the basaltic flows of VSF and the acidic flows of PF can be attributed to their distinct morphologies, emplacement processes and lithofacies associations.

Petrographic analysis revealed different porosity patterns associated with various lava flow lithofacies. Vesicles and amygdalae are common in basaltic and dacitic vesicular lithofacies (vB and vD), as well as in breccia fragments (bB and bBs) similarly to what is found in other profiles in the SGG for basaltic lithologies (Barreto et al., 2017; Rossetti et al., 2019) and acidic lithologies (Simões et al., 2018; Besser et al., 2018). These characteristics of basaltic lithofacies are common in LIPs worldwide, such as the Deccan Traps (Duraishwami et al., 2022) and the Columbia River Basalt Group (Reidel et al., 2016). Diktytaxitic texture, which is exclusively found in massive basalts (mB), is predominantly filled with zeolites and subordinately with clay minerals. Fractures and drusy-type pores occur independently of the lithofacies, possibly because these porosity types are associated with secondary processes, such as tectonic activity or partial precipitation of secondary minerals, and do not show a correlation with the lithofacies or lava flow type. Drusy-type pores are more commonly associated with vesicles and their partial fillings than fractures, likely because fractures are often related to the circulation of hydrothermal fluids, facilitating precipitation in these conduits (Couves et al., 2016).

The dissolution and fragmentation of primary minerals, especially plagioclase, were more commonly found in acidic rocks, this characteristic could correlate with deuteric crystal dissolution for feldspar, describe by Sruoga and Rubinstein (2007) in the Austral Basin's Cerro Norte rhyolites. The dissolution of secondary minerals (mainly zeolites) and the matrix occurs mostly in basaltic lithofacies, these features could indicate a significant influence of hydrothermal alteration events (Barreto et al., 2017), driven by the low-temperature formation of zeolite and the instability of glass (Mcphie

et al., 1993). Experimental evidence shows that zeolites can dissolve when crystals are immersed in either an alkaline or acidic aqueous solution at room temperature (Yamamoto et al., 1996).

Although studies show a positive correlation between porosity and permeability in the SGG (Rossetti et al., 2019), the samples from this study and other locations (e.g., Becker et al., 2019), still had low permeability (<0.2 mD) (Figure 8-A) when exhibiting relatively high porosity, possibly due to the intense precipitation of secondary minerals. Therefore, the original porosity was significantly affected by secondary processes of precipitation, mainly by zeolites and clay minerals.

Fractures identified in petrographic analysis do not reflect the field observation of the diversity of fractures families within and between lava flows. Additionally, the core plugs studied represent the porosity and permeability of the matrix, while fractured zones were not sampled. A detailed study and mapping of fracture patterns is necessary for the SGG, especially for the VSF. Fracturing, whether primary (cooling joints - e.g., columnar joints and entablatures) or secondary (tectonic), is crucial for volcanic reservoirs and can significantly increase permeability, as they can act as conduits for fluid flow, whether for oil and gas or even for geological CO₂ storage (Wu et al., 2010; Couves et al., 2016). Even fractures in thick massive cores, like columnar joints and entablature, can act as permeable pathways to more favorable reservoir horizons such as breccia zones, forming layer-cake type plays when stacked (Couves et al., 2016). This is similar to what is observed in the Cabiúnas Formation, responsible for the oil-producing volcanic reservoirs in the Badejo and Linguado fields (Campos Basin) (Mizusaki et al., 1986; 1988; Marins et al., 2022).

The presence of secondary precipitation is very common in vesicles and fractures in the samples studied. These minerals are commonly zeolites and clay minerals, but smectites and chalcedony can also occur. Celadonite was not identified in the samples studied, though commonly found as a secondary mineral in basaltic rocks of SGG (e.g., Gilg et al., 2003; Commin-Fischer et al., 2010; Rossetti et al., 2019). Despite the low permeability recorded, the presence of these precipitates indicates sufficient permeability for the circulation of hydrothermal fluids (Couves et al., 2016). These fluids are capable of both clogging and creating pores, generally through the dissolution of primary and secondary minerals. The presence of secondary mineral dissolution, such as zeolites, can also indicate different events of fluid circulation.

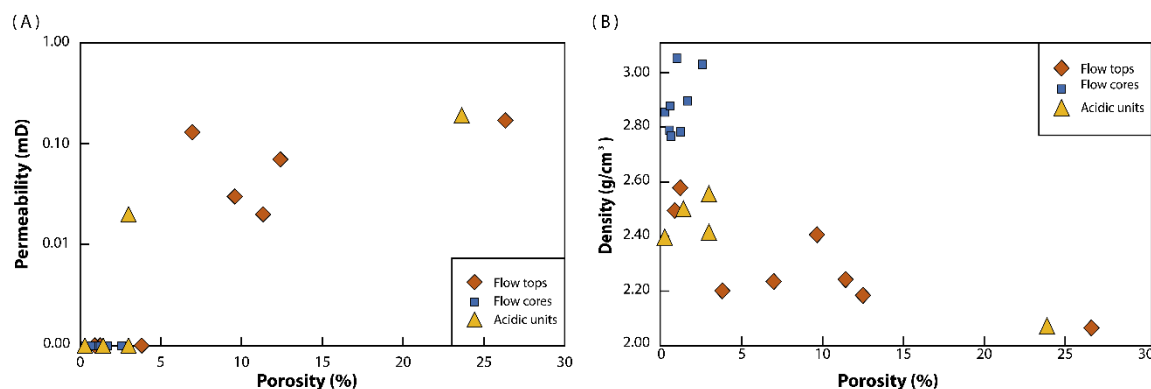
The presence of secondary minerals can cause greater variability in density values, as well as the presence or absence of pores. Density generally shows a

negative correlation with porosity, with higher density values associated with lower porosity (e.g., Christensen and Wilkens 1982; Single and Jerram, 2004; Becker et al., 2019; Rossetti et al., 2019). This characteristic was observed in this study (Figure 8-B), with the presence of four main groups of density values (Table 1). Brecciated lithofacies (bB and bBs) have an average density of 2.3 g/cm^3 , possibly due to higher porosity and zeolite content filling the interclast spaces and vesicles. In contrast, the massive lithofacies (mB) show higher values, averaging 2.88 g/cm^3 . For acidic rocks, two groups are identified: the low-porosity lithofacies (gpD and vtpD) with an average of 2.47 g/cm^3 , and the porous lithofacies (vD) with a value of 2.07 g/cm^3 . These results are similar to those reported by Becker et al. (2019) and Rossetti et al. (2019) studies of the volcanic rocks of the Serra Geral Group.

The Serra Geral Group represents an excellent analog for studies of volcanic sequences in the Brazilian margin basins (Reis et al., 2014), especially the Cabiúnas Formation, responsible for volcanic reservoirs in the Badejo and Linguado fields in the Campos Basin. This formation comprises an intercalation of basaltic flows (compound pahoehoe and rubbly pahoehoe) with siliciclastic sediments and volcanoclastic rocks, such as peperites and tuffs (Mizusaki et al., 1986, 1988; Marins et al., 2022). This magmatism is temporally associated with the Paraná-Etendeka Igneous Province, of tholeiitic geochemical affinity with low concentrations of incompatible elements and TiO_2 , possibly correlated with the early stages of rifting (Mizusaki et al., 1992). The oil in these reservoirs is located in vesicular lithofacies, dissolution pores, and fractures within unconventional volcanic reservoirs (Mizusaki et al., 1986; 1988; Marins, 2022).

Although facies architecture and lava morphology studies are crucial, such works remain scarce for the Cabiúnas Formation (Mizusaki et al., 1988; Marins et al., 2022; Braga et al., 2023). Recently, Marins et al. (2022) worked on the characterization of lithofacies and their associations in drill cores in the Cabiúnas Formation, dividing the volcanic pile into four units: units 1 and 3 characterized by compound pahoehoe flows; and units 2 and 4 consisting of rubbly pahoehoe flows. The similarity in flow types, as well as in magmatism origin, allows for comparison with the Torres Formation (simple and compound pahoehoe) and Vale do Sol Formation (rubbly pahoehoe) of the Serra Geral Group (Rossetti et al., 2018). The intercalation between units (rubbly pahoehoe and compound pahoehoe) is not observed in the SSG (Rossetti, 2018), nor in the investigated region. Furthermore, peperites or intertrap sandstones were not identified in the study area.

Besides the energy industry's interest, the Serra Geral Group has significant potential for geological CO₂ storage studies (Ketzer et al., 2015; Pelissari et al., 2023). Reactivity studies in basaltic rocks show rapid carbonate precipitation (aragonite-calcite and dolomite), especially in crystalline basalts, due to the high reactivity with primary Ca-rich minerals, such as plagioclase and clinopyroxene (Ferreira et al., 2024). The studied basalts, based on petrographic analysis, show a fine-grained holocrystalline texture for the core of rubbly pahoehoe flows, with a high index of plagioclase and pyroxene. The breccia zones of rubbly pahoehoe flows are usually the main targets for injection of CO₂ in these morphologies (e.g., Wallula Project – USA, McGrail et al., 2014). In the Vale do Sol Formation, these zones also exhibit the best potential, as they display the highest porosity and permeability values. The reactivity of this lithofacies needs further investigation due to its low crystallinity and aphanitic texture.



primary minerals. The rubbly pahoehoe flows exhibit a greater lateral extent compared to the vesicular portions in dacitic flows. Despite some high porosity values, the overall permeability is low ($>1\text{mD}$). However, this does not take into account the degree of fracturing observed in the field.

Analyses of the petrophysical properties in samples from the Antas River Valley region, associated with the VSF and PF, indicate that the brecciated flow tops of VSF presents the best reservoir characteristics, although generally the porosities values are too low to be considered good-quality reservoirs. The low porosity data is mainly associated with high presence of secondary minerals precipitated in the pores, suggesting a high complexity system, associated with primary and secondary processes capable of creating or obstructing porosity. This process depends on local and regional events, such as tectonics and the circulation of meteoric/hydrothermal fluids. Therefore, the SGG needs to be studied more comprehensively across all scales, requiring a range of studies to understand the complex petrophysical patterns and the evolution of secondary processes. Thus, the SGG should not be dismissed as an analog for CO_2 storage and oil and gas studies in offshore Brazilian basins, due to its accessibility and lower cost compared to well studies.

Given the complexity of volcanic reservoirs and the challenges in quantifying fractures, future studies should focus on detailed stratigraphic analysis with an emphasis on fracture pattern analysis and petrophysical measurements. Additionally, large-scale integration is necessary for generating 3D models that incorporate petrophysical data.

Acknowledgements

This work was supported by the Human Resource Program of The Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas, and Biofuels – PRH-ANP, supported with resources from oil companies considering the contract clause nº 50/2015 of R, D&I of the ANP. The authors acknowledge the financial support by CNPq (406980/2021-7), Petrobras (2023/00150-4), FAPERGS (1922510001755-3) and FAPESP (19/22084-8). Evandro Lima is thankful for CNPq grants (309483/2030-4).

References

- 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., 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 Paraná, Plateau (Brazil): Palaeomagnetism, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *J. Petrol.* 25, 579–618. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.3.579>.
- Besser, M.L., Vasconcellos, E.M.G., Nardy, A.J.R. 2018. Morphology and stratigraphy of Serra Geral silicic lava flows in the northern segment of the Torres Trough, Paraná Igneous Province. *Brazilian Journal of Geology*, 48 (2), 201–219. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180087>
- Braga, D.D., Valente, S.C., Marins, G.M., Parisek-Silva, Y.M., Famelli, N. 2023. 3D Paleogeographic Reconstruction of the Cabiúnas formation lava flows in Campos basin, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 130, 2023, 104537. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104537>.
- Commin-Fischer, A., Berger, G., Polvé, M., Dubois, M., Sardini, P., Beaufort, D., Formoso, M., 2010. Petrography and chemistry of SiO₂ filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 29, Issue 3, 751-760. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.002>
- 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. *J. Petrol. Geol.* 39, 79–94. <https://doi.org/10.1111/jpg.12629>
- Christensen N.I., Wilkens R.H. 1982. Seismic properties, density, and composition of the Icelandic crust near Reydarfjörður. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B8):6389-6395. <https://doi.org/10.1029/JB087iB08p06389>
- Duraiswami, R.A., Bondre, N.R., Managave, S., 2008. Morphology of rubbly pahoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: implications for style of

- emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177, 822–836. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.048>
- Duraiswami, R. A., Sanklecha, H., Monteiro, A., Gadpallu, P., & Sisolekar, S. (2022). Morphology, Textures and Thicknesses of Rubbly Pahoehoe Lavas from the ~117 Ma Sylhet Traps, India. *Journal of the Geological Society of India*, 98(5), 591–599. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2031-0>
- Ernesto, M., Pacca, I.G., Hiodo, F.Y. & Nardy, A. J.R. 1990. Palaeomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil. *Phys. Earth Planet. Inter.* 64, 153–175. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90035-V](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90035-V).
- Ferreira, A., Santos, R.V., de Almeida, T.S. Camargo, M.A., Filho, J.A., Miranda, C.R., Passos, S.T.A, Baptista, A.D.T, Tassinari, C.C.G., Rubio, V.A, Capistrano, G.G. 2024. Unraveling the rapid CO₂ mineralization experiment using the Paraná flood basalts of South America. *Sci Rep* 14, 8116. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58729-w>
- Fornero, S. A., Marins, G. M., Lobo, J. T., Freire, A. F. M., & Lima, E. F. de. (2019). Characterization of subaerial volcanic facies using acoustic image logs: Lithofacies and log-facies of a lava-flow deposit in the Brazilian pre-salt, deepwater of Santos Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 99(August 2018), 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.09.029>
- Furukawa, K. and Uno, K., 2015. Origin and deformation of high porosity bands in the Takanoobane Rhyolite lava of Aso volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 76-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.021>
- Gilg, H.A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I., Strieder, A.J., 2003. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil. A fluid inclusion, REE, oxygen, carbon and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. *Mineral. Deposita* 38, 1009–1025. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0310-7>
- Gladchenko, T.P., Hinz, K., Eldholm, O., Meyer, H., Neben, S., Skogseid, J. 1997. South Atlantic volcanic margins. *J. Geol. Soc. London*. 154, 465–470. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.154.3.0465>.
- Gomes, A.S., Vasconcelos, P.M. 2021. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth-Science Reviews*, Volume 220, 103716. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103716>.
- Guilbaud, M.-N., Thordarson, T., Blake, S., 2005. Morphology, surface structures, and emplacement of lavas produced by Laki, A.D., 1783–1784. In: Manga, M., Ventura, G.

- (Eds.), Kinematics and Dynamics of Lava Flows. Geological Society of America Special Paper, vol. 396, pp. 81–102. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2396-5.81>
- Horn, B.L.D., Oliveira, A.A., Simões, M.S, Besser, M.L., Araújo, L.L. 2022. Projeto Geologia e Potencial Mineral da Bacia do Paraná. Mapa Geológico. Porto Alegre. SGB/CPRM. Escala 1:1000000. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23037>
- Ketzer, J.M., Machado, C.X., Rockett, G.X., Iglesias, R.S. 2015. Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage. Porto Alegre, EDIPUCRS, 66p.
- Mantovani, M.S.M., Stewart, K., Turner, S. & Hawkesworth, C.J. 1985. 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.
- Marins, G.M., Parizek-Silva, Y., Millett, J.M., Jerram, D.A., Rossetti, L.M.M., Jesus e Sousa, A., Planke, S., Bevilacqua, L.A., Carmo, I.O. 2022. Characterization of volcanic reservoirs; insights from the Badejo and Linguado oil field, Campos Basin, Brazil. Marine and Petroleum Geology, Volume 146. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105950>
- Matter, J.M., Broecker, W., Stute, M., Gislason, S., Oelkers, E., Stefansson, A., Wolff-Boenisch, D., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G. & Bjornsson, G. 2009. Permanent carbon dioxide storage into basalt: the CarbFix pilot project, Iceland. Energy Procedia 1 (1), 3641–3646. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.160>.
- McGrail, B.P., Spane, F.A., Amonette, J.E., Thompson, C. & Brown, C.F. 2014. Injection and monitoring at the Wallula basalt pilot project. Energy Procedia 63, 2939–2948. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.316>.
- McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993. Volcanic Textures: a Guide to the Interpretation of Textures in Volcanic Rocks. Hobart, CODES Key Centre, University of Tasmania, p. 196.
- Millett, J.M., Rossetti, L., Bischoff, A., Rossetti, M., Rosenqvist, M.P., Avseth, P., Hole, M., Pierdominici, S., Healy, D., Jerram, D., Plankem, S. 2024. Lava flow-hosted reservoirs: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 547. <https://doi.org/10.1144/SP547-2023-102>
- Mizusaki, A.M.P., 1986. Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da bacia de Campos - Caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. MSc. Thesis, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil ([in Portuguese]).

- Mizusaki, A.M.P., Thomaz Filho, A., Valença, J. 1988. Volcano-sedimentary sequence of neocomian age in Campos basin (Brazil). *Rev. Bras. Geociencias*, 18, 247–251.
- Mizusaki, A.M.P., Petrini, R., Bellieni, P., Comin-Chiaramonti, P., Dias, J., De Min, A., Piccirillo, E.M., 1992. Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos basin). *Contrib. Mineral. Petrol.* 111, 143–160. <https://doi.org/10.1007/BF00348948>.
- Navarro, J., Teramoto, E. H., Engelbrecht, B. Z., & Kiang, C. H. 2020. Assessing hydrofacies and hydraulic properties of basaltic aquifers derived from geophysical logging. *Brazilian Journal of Geology*, 50(4), e20200013. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020200013>
- Oliveira, F.V.C.S.R.S, Carmo, I.O., Costa, J., Bittencourt, B.T., Lupinacci, W.M., Freire, A.F.M. 2024. Characterization of subaerial lava flows of the presalt strata in the Santos Basin based on basic well logs. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 139, 104884. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104884>.
- Peate, D., Hawkesworth, C. & Mantovani, 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.W., 1997. The Paraná-Etendeka Province. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, vol. 100, 217–245. <https://doi.org/10.1029/GM100p0217>.
- Pelissari, R.M., Relva, G.S., Peyerl, D. 2023. Possibilities for carbon capture, utilization, and storage in Brazil. In: Peyerl, D., Relva, S., Silva, V. (Ed.). *Energy Transition in Brazil. The Latin American Studies Book Series*. Springer, Cham, p.141 – 157. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4_9
- Petford, N. 2003. Controls on primary porosity and permeability development in igneous rocks. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 214, 93–107. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.214.01.06>.
- Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic flood volcanism from the Paraná Basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: IAG-USP.
- Polo, L.A., Janasi, V.A., Giordano, D., Lima, E.F., Cañon-Tapia, E., Roverato, M. 2018. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Evidence for locally-fed lava flows and domes from detailed field work. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 355, Pages 204-218. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.007>.

- Reidel, S. P., Camp, V. E., Martin, B. S., Tolan, T. L., & Wolff, J. A. (2016). The Columbia River Basalt Group of western Idaho and eastern Washington-Dikes, vents, flows, and tectonics along the eastern margin of the flood basalt province. *GSA Field Guides*, 41, 127–150. [https://doi.org/10.1130/2016.0041\(04\)](https://doi.org/10.1130/2016.0041(04))
- Reis, G.S, Mizusaki, A.M., Roseinberg, A., Rubert, R.R. 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, 41 (2): 155-168. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78093>
- Rocha, B.C., Davies, J.H.F.L., Janasi, V.A., Schaltegger, U., Nardy, A.J.R., Greber, N.D., Lucchetti, A.C.F., Polo, L.A. 2020. Rapid eruption of silicic magmas from the Paraná magmatic province (Brazil) did not trigger the Valanginian event. *Geology*, 48 (12): 1174–1178. <https://doi.org/10.1130/G47766.1>
- Rosenqvist, M. P., Meakins, M. W. J., Planke, S., Millett, J. M., Kjøl, H. J., Voigt, M. J., & Jamtveit, B. (2023). Reservoir properties and reactivity of the Faroe Islands Basalt Group: Investigating the potential for CO₂ storage in the North Atlantic Igneous Province. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103838>
- Rossetti, L.M.L.M., Lima, E.F.E.F., Waichel, B.L.B.L., Scherer, C.M.C.M. & Barreto, C.J.C.J. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. South Am. Earth Sci.* 56, 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>.
- 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>.

- Single, R. T., and D. A. Jerram, 2004, The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Palaeogene Skye Lava Field: *Journal of the Geological Society*, v. 161, p. 911–926, <https://doi.org/10.1144/0016-764903-136>.
- 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. <https://doi.org/10.1306/08290605173>.
- 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. Geotherm. Res.* 215–216, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004>.
- Wu, X., Liu, T., Su, L., Su, J. 2010. Lithofacies and reservoir properties of Tertiary igneous rocks in Qikou Depression, East China. *Geophys. J. Int.* 181, 847–857. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04559.x>
- Zou, C. (2013). *Volcanic reservoirs*. USA, Elsevier, 193 p.

Appendix A

Table 1 – Lithofacies description and interpretation of the studied region.

Lithofacies	Description	Lithofacies association and interpretation
saD	Aphanitic with horizontal flow foliation structures Dacite – structures marked by alternating millimetric bands with varying degrees of crystallinity and oxidation. Common autobreccias, tight flow folds and flow-stretched fragments.	Feeder conduits for acidic lava flows.
zvD	Zeolitized vesicular Dacite – highly altered with a greenish color.	Acidic lava flows with simple tabular morphology. Characterized by a very thick core (gpD) and an outer crust (vtpD) featuring flow foliation structures (haD) with lobate terminations and marked by vesicular dacite (vD and zvD).
vD	Vesicular Dacite – highly vesicular zone, oval morphology, ranging from 1 – 10 mm.	
vtpD	Vitrophyric porphyritic Dacite – rare vesicles and amygdaloids.	
gpD	Granophytic porphyritic Dacite – with devitrified textures, rare vesicles and amygdaloids.	
haD	Aphanitic with horizontal flow foliation structures Dacite – structures marked by alternating millimetric bands with varying degrees of crystallinity and oxidation.	
bB	Brecciated Basalt – composed of vesicular to amygdaloidal volcanic fragments.	Rubbly pahoehoe flows of simple tabular morphology. Characterized by upper portion composed of rubbly autobreccias (bB and bBs), vesicular zone (vB) located above the core and below the breccia and a massive core (mB).
bBs	Brecciated Basalt – composed of vesicular to amygdaloidal volcanic fragments with the interclast filled with sandstone.	
vB	Vesicular Basalt – dense vesicular zone, oval to irregular morphology, ranging from 0.1 – 1 mm.	
mB	Massive Basalt – rarely contains vesicles and amygdaloids, common columnar jointing (when thicker) and entablatures (usually at the base).	

CAPÍTULO V

5. REFERÊNCIAS

Anderson, A.T., Swihart, G.H, Artioli, G., Geiger, C.A. 1984. Segregation vesicles, gas filter-pressing, and igneous differentiation. *Journal of Geology*, vol. 92, p. 55-72.

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. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(88\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(88)90028-5).

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., 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 Paraná, Plateau (Brazil): Palaeomagnetism, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *J. Petrol.* 25, 579–618. doi:10.1093/petrology/25.3.579.

Besser, M.L., Vasconcellos, E.M.G., Nardy, A.J.R. 2018. Morphology and stratigraphy of Serra Geral silicic lava flows in the northern segment of the Torres Trough, Paraná Igneous Province. *Brazilian Journal of Geology*, 48 (2), 201–219. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180087>

Branney, M.J., Bonnichsen, B., Andrews, G.D.M., Ellis, B. & Barry, T.L., McCurry, M. 2008. “Snake River (SR)-type” volcanism at the Yellowstone hotspot track: distinctive products from unusual, hightemperature silicic super-eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 70, 293–314. doi:10.1007/s00445-007-0140-7.

- Bryan, S.E. & Ernst, R.E., 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth-Science Rev.* 86, 175–202. doi:10.1016/j.earscirev.2007.08.008.
- Bryan, S.E., Riley, T.R., Jerram, D.A., Stephens, C.J, Leat, P.T. 2002. Silicic volcanism: An undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. *Geological Society of America*, Special Paper 362, p. 99–120. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2362-0.97>
- Callow, B., Falcon-Suarez, I., Ahmed, S. & Matter, J., 2018. Assessing the carbon sequestration potential of basalt using X-ray micro-CT and rock mechanics. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 70, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.12.008>.
- Carneiro, P., Dullius, J., Lagabue, R., Machado, C., Ketzer, J.M., Einloft, S. 2013. Carbonatação do basalto e seu potencial uso no armazenamento de CO₂. *Tecnol. Metal. Mater. Min.*, Vol.10, n1, p.43-49. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.006>
- Cas, R.A.F. & Wright J.V. 1988. *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. London, Allen & Unwin, 522 p.
- Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1992. Volcanism and continental break-up: a global compilation of large igneous provinces. *Geological Society of London Special Publication*, vol. 68, p. 17 e 30. doi:10.1144/GSL.SP.1992.068.01.02.
- Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev. Geophys.* 32, 1. doi:10.1029/93RG02508.
- Courtillot, V., Jaupart, C., Manighetti, I., Tapponnier, P. & Besse, J. 1999. On casual links between flood basalts and continental breakup. *Earth Planet. Sci. Lett.* 166, 177–195. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00282-9.
- 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.
- Duraiswami, R.A., Bondre, N.R. & Managave, S. 2008. Morphology of rubbly pahoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: Implications for style of

emplacement. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 177, 822–836. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.048.

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. *J. Asian Earth Sci.* 84, 146–166. doi:10.1016/j.jseaes.2013.08.025.

Duraiswami, R.A., Sanklecha, H., Monteiro, A., Gadpallu, P., Sisoilekar, S. 2022. Morphology, Textures and Thicknesses of Rubbly Pahoehoe Lavas from the ~117 Ma Sylhet Traps, India. *J Geol Soc India*, 98, 591–599. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2031-0>

Ernesto, M., Pacca, I.G., Hiodo, F.Y. & Nardy, A. J.R. 1990. Palaeomagnetism of the Mesozoic Serra Geral Formation, southern Brazil. *Phys. Earth Planet. Inter.* 64, 153–175. doi:10.1016/0031-9201(90)90035-V.

Ernst, R.E. & Buchan, K.L. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 469–523. doi:10.1146/annurev.earth.31.100901.145500.

Erol, S., Akin, T., Baser, A., Saraçoğlu, O. & Akin, S. 2022. Fluid-CO₂ injection impact in a geothermal reservoir: evaluation with 3-D reactive transport modeling. *Geothermics* 98, 102271. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102271>.

Ferreira, A., Santos, R.V., de Almeida, T.S. Camargo, M.A., Filho, J.A., Miranda, C.R., Passos, S.T.A, Baptista, A.D.T, Tassinari, C.C.G., Rubio, V.A, Capistrano, G.G. 2024. Unraveling the rapid CO₂ mineralization experiment using the Paraná flood basalts of South America. *Sci Rep* 14, 8116. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58729-w>

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. doi: 10.1130/0016-7606(1983)94<362:SAEOAR>2.0.CO;2.

Florisbal, L.M., Heaman, L.M., de Assis Janasi, V. & de Fatima Bitencourt, M. 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná–Etendeka Magmatic

Province: A reappraisal based on precise U–Pb dating. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 289, 140–150. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.11.007.

Frank, H.T., Elisa, M., Gomes, B., Luiz, M. & Formoso, L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas. em Geociencias*, 36 (1), 49–57. doi: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.17874>.

Gislason, S.R., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Oelkers, E.H., Gunnlaugsson, E., Sigurdardottir, H., Sigfusson, B., Broecker, W.S., Matter, J.M. & Stute, M. 2010. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 4 (3), 537–545. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.11.013>.

Gladchenko, T.P., Hinz, K., Eldholm, O., Meyer, H., Neben, S., Skogseid, J. 1997. South Atlantic volcanic margins. *J. Geol. Soc. London*. 154, 465–470. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.154.3.0465>.

Gomes, A.S., Vasconcelos, P.M. 2021. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth-Science Reviews*, Volume 220, 103716. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103716>.

Guilbaud, M., Self, S., Thordarson, T. & Blake, S. 2005. Morphology, surface structures, and emplacement of lavas produced by Laki, AD 1783–1784. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 396, 81–102. doi:10.1130/2005.2396(07).

Gunnarsson, I., Aradottir, E.S., Oelkers, E.H., Clark, D.E., Arnarson, M.P., Sigfússon, B., Snæbjornsdottir, S.O., Matter, J.M., Stute, M. & Júlíusson, B.M. 2018. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 79, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.08.014>.

Horn, B.L.D., Oliveira, A.A., Simões, M.S, Besser, M.L., Araújo, L.L. 2022. *Projeto Geologia e Potencial Mineral da Bacia do Paraná*. Mapa Geológico. Porto Alegre. SGB/CPRM. Escala 1:1000000. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23037>

IPCC, 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007. In: Metz, B., et al. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, United States.

Jerram, D.A. 2002. Volcanology and facies architecture of flood basalts, In: Special Paper 362: Volcanic Rifted Margins. *Geological Society of America*, p. 119–132. doi:10.1130/0-8137-2362-0.119.

Kelektoglou, K. 2018. Carbon capture and storage: a review of mineral storage of CO₂ in Greece. *Sustainability* 10 (12), 4400. <https://doi.org/10.3390/su10124400>.

Ketzer, J.M., Machado, C.X., Rockett, G.X., Iglesias, R.S. 2015. *Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage*. Porto Alegre, EDIPUCRS, 66p.

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.

Koptev, A., Cloetingh, S. 2024. Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer”. *Commun Earth Environ* 5, 27. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>

Lima, E.F. De, Waichel, B.L.B.L., Rossetti, L.D.M.M., Viana, A.R., Scherer, C.M.C.M., Bueno, G.V.G.V., Dutra, G., De Lima, E.F., Waichel, B.L.B.L., Rossetti, L.M.M., Viana, A.R., Scherer, C.M.C.M., Bueno, G.V.G.V. & Dutra, G. 2012. Morphological and petrographic patterns of the pahoehoe and “a”ã flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul state, Brazil). *Brazilian J.* 42, 744–753. doi:10.5327/Z0375-75362012000400007.

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>.

Macdonald G.A. 1953. Pahoehoe, a'a, and block lava. *American Journal of Science*, 251:169-191. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.251.3.169>

Mantovani, M.S.M., Stewart, K., Turner, S. & Hawkesworth, C.J. 1985. 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.

Marins, G.M., Parizek-Silva, Y., Millett, J.M., Jerram, D.A., Rossetti, L.M.M., Jesus e Sousa, A., Planke, S., Bevilacqua, L.A., Carmo, I.O. 2022. Characterization of volcanic reservoirs; insights from the Badejo and Linguado oil field, Campos Basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 146. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105950>

Matter, J.M., Broecker, W., Stute, M., Gislason, S., Oelkers, E., Stefansson, A., Wolff-Boenisch, D., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G. & Bjornsson, G. 2009. Permanent carbon dioxide storage into basalt: the CarbFix pilot project, Iceland. *Energy Procedia* 1 (1), 3641–3646. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.160>.

Matter, J.M., Stute, M., Snæbjornsdottir, S.O., Oelkers, E.H., Gislason, S.R., Aradottir, E. S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardottir, H. & Gunnlaugsson, E. 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352 (6291), 1312–1314. doi: 10.1126/science.aad8132.

McGrail, B.P., Spane, F.A., Amonette, J.E., Thompson, C. & Brown, C.F. 2014. Injection and monitoring at the Wallula basalt pilot project. *Energy Procedia* 63, 2939–2948. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.316>.

McGrail, B.P., Schaef, H.T., Spane, F.A., Cliff, J.B., Qafoku, O., Horner, J.A., Thompson, C.J., Owen, A.T. & Sullivan, C.E. 2017. Field validation of supercritical CO₂ reactivity with basalts. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 4 (1), 6–10. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00387>.

McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993. *Volcanic Textures: a Guide to the Interpretation of Textures in Volcanic Rocks*. Hobart, CODES Key Centre, University of Tasmania, p. 196.

Meucci, M.C. 2022. Estratigrafia e padrões de porosidade das rochas vulcânicas da região da cachoeira da mulada, Caxias do Sul, RS. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2022.

Milani, E.J., Henrique, J., Melo, G. De, Souza, P.A. De, Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. Bol. *Geociências da Petrobras* 15(2):265–287.

Millett, J.M., Rossetti, L., Bischoff, A., Rossetti, M., Rosenqvist, M.P., Avseth, P., Hole, M., Pierdominici, S., Healy, D., Jerram, D., Plankem, S. 2024. Lava flow-hosted reservoirs: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 547. <https://doi.org/10.1144/SP547-2023-102>

Mizusaki, A.M.P., Thomaz Filho, A., Valença, J. 1988. Volcano-sedimentary sequence of neocomian age in Campos basin (Brazil). *Rev. Bras. Geociências*, 18, 247–251.

Mizusaki, A.M.P., Petrini, R., Bellieni, P., Comin-Chiaramonti, P., Dias, J., De Min, A., Piccirillo, E.M., 1992. Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos basin). *Contrib. Mineral. Petrol.* 111, 143–160. <https://doi.org/10.1007/BF00348948>.

Navarro, J., Teramoto, E. H., Engelbrecht, B. Z., & Kiang, C. H. 2020. Assessing hydrofacies and hydraulic properties of basaltic aquifers derived from geophysical logging. *Brazilian Journal of Geology*, 50(4), e20200013. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020200013>

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

Peate, D.W., 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney, J.J., Coffin, M.F. (Ed.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, vol. 100, 217–245. <https://doi.org/10.1029/GM100p0217>.

- Peate, D., Hawkesworth, C., Mantovani, M., Rogers, N.W. & Turner, S. 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt province and implications for the nature of “Dupal”-type mantle in the South Atlantic Region. *J. Petrol.* 40 (3), 451–473. doi: 10.1093/petroj/40.3.451.
- Pelissari, R.M., Relva, G.S., Peyerl, D. 2023. Possibilities for carbon capture, utilization, and storage in Brazil. *In: Peyerl, D., Relva, S., Silva, V. (Ed.). Energy Transition in Brazil. The Latin American Studies Book Series.* Springer, Cham, p.141 – 157. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4_9
- Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. *The Mesozoic flood volcanism from the Paraná Basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects.* São Paulo: IAG-USP.
- Polo, L.A., Janasi, V.A., Giordano, D., Lima, E.F., Cañon-Tapia, E., Roverato, M. 2018. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Evidence for locally-fed lava flows and domes from detailed field work. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 355, Pages 204-218. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.007>.
- Raposo, M.I.B., Ernesto, M. & Renne, P.R. 1998. Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the early Cretaceous Florianópolis dike swarm (Santa Catarina Island), Southern Brazil. *Phys. Earth Planet. Inter.* 108, 275–290. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201\(98\)00102-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00102-2).
- Reis, G.S, Mizusaki, A.M., Roseinberg, A., Rubert, R.R. 2014. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, 41 (2): 155-168. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78093>
- Rocha, B.C., Davies, J.H.F.L., Janasi, V.A., Schaltegger, U., Nardy, A.J.R., Greber, N.D., Lucchetti, A.C.F., Polo, L.A. 2020. Rapid eruption of silicic magmas from the Paraná magmatic province (Brazil) did not trigger the Valanginian event. *Geology*, 48 (12): 1174–1178. doi: <https://doi.org/10.1130/G47766.1>
- Rossetti, L.M.L.M., Lima, E.F.E.F., Waichel, B.L.B.L., Scherer, C.M.C.M. & Barreto, C.J.C.J. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. South Am. Earth Sci.* 56, 409–421. doi: 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, L.M.M. 2018. *Litoestratigrafia e geoquímica da Província Ígnea do Paraná-Etendeka e caracterização dos aspectos petrofísicos de seqüências vulcano-sedimentares*. Porto Alegre, 239p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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>.

Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R. & Maroto-Valer, M. 2014. A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chem. Soc. Rev.* 43 (23), 8049–8080. <https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>.

Sandalow, D., Aines, R., Friedmann, J., Kelemen, P., McCormick, C., Power, I., Schmidt, B., Wilson, S., 2021. Carbon Mineralization Roadmap Draft October 2021. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States). <https://www.osti.gov/biblio/1829577>

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., Keszthelyi, L. & Thordarson, T. 1998. The Importance of Pahoehoe. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 26, 81–110. doi: 10.1146/annurev.earth.26.1.

Self, S., Thordarson, T. & Keszthelyi, L. 1997. Emplacement of Continental Flood Basalt Lava Flows, Large igneous provinces: Continental, oceanic, and Planetary Flood Volcanism, Geophysical Monograph Series. *American Geophysical Union*, Washington, D. C. doi:10.1029/GM100.

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>.

Simões, M.S. 2018 Litofácies, fábrica magnética e geoquímica de condutos alimentadores e lavas ácidas do Grupo Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 243p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Simões, M.S., Lima, E.F., Rossetti, L.M.M., Sommer, C.A. 2019. The low-Ti high-temperature dacitic volcanism of the southern Paraná-Etendeka LIP: Geochemistry, implications for trans-Atlantic correlations and comparison with other Phanerozoic LIPs. *Lithos*, 342–343, 187–205. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.030>

Simões, M.S., Sommer, C.A., Lima, E.F., Rossetti, L.M.M., Besser, M.L. 2023. Silicic lavas with no basal breccia: origin of the thinly jointed basal facies of low-Ti dacites in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Bull Volcanol* 85, 16. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01631-6>

Snæbjörnsdóttir S.O., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S.R. & Oelkers, E. H. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1 (2), 90–102. doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>.

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. doi: 10.1306/08290605173.

Teir, S., 2008. Fixation of Carbon Dioxide by Producing Carbonates from Minerals and Steelmaking Slags. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Energy Technology. <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512293537>

Thordarson, T. & Self, S. 1998. The Roza Member, Columbia River Basalt Group: A gigantic pahoehoe lava flow field formed by endogenous processes? *J. Geophys. Res. Solid Earth* 103, 27411–27445. doi:10.1029/98JB01355.

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. Geotherm. Res.* 215–216, 74–82. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004.

Walker, G.P.L. 1971. Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bull. Volcanol.* 35, 579–590. doi:10.1007/BF02596829.

White, S.K., Spane, F.A., Schaef, H.T., Miller, Q.R.S., White, M.D., Horner, J.A. & McGrail, B.P. 2020. Quantification of CO₂ mineralization at the Wallula Basalt pilot project. *Environ. Sci. Technol.* 54 (22), 14609–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05142>.

Zou, C. (2013). *Volcanic reservoirs*. USA, Elsevier, 193 p.