



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

GABRIEL CALZIA BROSE

**PADRÕES DE POROSIDADE NAS ROCHAS SUBVULCÂNICAS DO COMPLEXO
TRINDADE, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

PORTO ALEGRE

2022

GABRIEL CALZIA BROSE

**PADRÕES DE POROSIDADE NAS ROCHAS SUBVULCÂNICAS DO COMPLEXO
TRINDADE, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

Supervisora: Me. Natália Gauer Pasqualon

PORTO ALEGRE

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Pranke

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Vice-Diretora: Tatiana Silva da Silva

Brose, Gabriel Calzia

PADRÕES DE POROSIDADE NAS ROCHAS SUBVULCÂNICAS DO
COMPLEXO TRINDADE, ILHA DA TRINDADE, BRASIL / Gabriel Calzia Brose.
– Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2022.

86 f.

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

Orientador: Evandro Fernandes de Lima.

1. Ilhas Vulcânicas. 2. Microtomografia de Raios X. 3. Reservatórios Não
Convencionais.

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**PADRÕES DE POROSIDADE NAS ROCHAS SUBVULCÂNICAS DO COMPLEXO TRINDADE, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**" elaborado por "GABRIEL CALZIA BROSE", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Me. Andrea Sander

Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

Dr. Vinicius Matté

AGRADECIMENTOS

Quem conhece o dia a dia de um estudante de geologia sabe que às vezes nosso trabalho não é fácil. Aos que concluem o curso, vos digo: somos vencedores, mas também sobreviventes. Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me dar o suporte financeiro, institucional e profissional para o desenvolvimento de minhas habilidades como geólogo. Aos meus amigos, agradeço pelo apoio mental e psicológico, que nem sempre foram constantes, mas que me permitiu chegar até aqui com saúde e fome pelo conhecimento. Nenhuma educação é mais importante do que a outra. A educação deve ser sempre semeada e compreendida, em todas as suas formas.

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, a minha mãe e ao meu pai, que há mais de 2 décadas sabem que a única maneira de atingir êxito na vida é pela educação e conhecimento verdadeiro. Aos que me criaram e que me apoiaram. Aos que já foram, principalmente aos meus avós, que por muito tempo financiaram meus estudos, para que eu pudesse chegar até este momento, e que me deram o carinho e aprendizado pela experiência. Às várias pessoas da família que não estão mais entre nós devido à pandemia do COVID-19, que adiou muitos sonhos para uma próxima vida. Ao meu irmão, que cursou por alguns semestres Engenharia Geológica na UFPEL e me trouxe o *feedback* de que geologia era o meu caminho. Agradeço aos que incentivaram meus momentos de infância e que acabaram por desenvolver um geólogo júnior. Sim, aquela criança que estava sempre juntando “pedras” nas ruas de chão batido em Bagé e que se perguntava: “o que é isso?”.

Gostaria de agradecer muitíssimo à Prof. Dra. Márcia Elisa Boscato Gomes, a primeira pessoa dentro da academia que viu em mim um potencial que nem eu mesmo sabia que tinha. A ela que me resgatou do mundo dos pântanos permianos e fez com que eu me apaixonasse pela mineralogia e pela petrologia. A ela, por quem eu tenho grande respeito e admiração. Agradeço também ao Maurício Dia da Silva, que me introduziu ao mundo das rochas alcalinas, confiou em mim e me fez também querer trabalhar com essas rochas extremamente complexas e interessantes.

Aos momentos de monitoria, tanto em Mineralogia II quanto em Petrologia Ígnea I, que me ensinaram muito além do que aprendi como aluno. Sabem aquelas

coisas de professor de ensino básico, quando te dizem: “eu aprendo muito mais com vocês?” Senti na pele e é verdade. Tanto em raciocínio geológico quanto em trabalho em equipe e didática para transmitir o conhecimento.

A ele, chamado pela maioria de China, mas que também responde por “mestre” ou simplesmente “man”, para os íntimos. Ao meu orientador, Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima, também hoje meu amigo, que confiou em mim para desenvolver esse projeto, apesar de saber o ser atrapalhado que sou. Aos grandes momentos em campo, na sala, de alegria e de agito, de loucura e de emoções. À Natália, minha supervisória deste trabalho, a quem muito me inspirou com volume e qualidade de trabalho. Gostaria de agradecer a todo o pessoal da 102-B, time que vem crescendo e se estabelecendo como um dos grandes centros de pesquisa em estratigrafia e petrologia de sequências vulcânicas do país. E não é à toa. Agradeço à Ingrid, Marcelinho, Natália e Vinícius, que sempre estiveram comigo, diretamente ou indiretamente, gerando grandes discussões na “nossa” sala, assim como momentos inesquecíveis de risos e de parcerias. Gostei muito de trabalhar com esse time repleto de novos talentos e gosto muito das pessoas que vocês são. A eles que me apoiaram em todos os momentos e aprimoraram-me como agora geólogo.

Ao Prof. Dr. Rualdo Menegat faço um agradecimento muito especial. Ele me ensinou o verdadeiro legado e compromisso com a educação, dentro e fora da sala de aula, assim como sempre soube tirar o melhor de mim, com muito respeito, apoio e incentivo. Transmitiu de maneira simples e concreta que a educação e as nossas pesquisas acadêmicas devem olhar para as próximas gerações. Às vezes são pequenas coisas que mudam nossa forma de ser.

Aos que me auxiliaram na realização das técnicas e métodos. Agradeço ao Prof. Dr. Luis Fernando de Ros e a seu grupo de pesquisa que me permitiu tirar as microfotografias em sua sala. Ao Schimba e ao JV, que me deram uma ajuda nos acréscimos do campeonato. Não poderia deixar também de mencionar o Prof. Dr. Breno Waichel e a sua equipe da UFSC, que me ajudaram a realizar os procedimentos com os testemunhos cilíndricos das amostras, algo extremamente difícil de realizar em Porto Alegre. Ao Adolpho Augustin e o pessoal do IPR da PUCRS, que pacientemente fizeram as minhas análises de Microtomografia e me acompanharam depois de muitos desafios.

O presente projeto de pesquisa é financiado pelo Programa de Recursos Humanos (Convênio PRH/FINEP – PRH 14.1 UFRGS) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Agradeço ao programa por todo o apoio e pela consolidação de um grupo forte coordenado pela Dra. Renata Alvarenga e pelo Prof. Dr. Roberto Ianuzzi. O autor deste trabalho também obteve auxílio internacional proveniente do *L. Austin Weeks Grant Program* da *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Foundation*. O apoio financeiro de instituições nacionais e internacionais é fruto do interesse da indústria do petróleo no desenvolvimento de pesquisa em diversas áreas da temática. O financiamento para a ida à Ilha da Trindade foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) em projetos anteriores para a Ilha da Trindade.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma, na prática ou psicologicamente, para a finalização deste trabalho. Espero não ter esquecido alguém injustamente.

O trabalho deve continuar. Avante!

“Nem tudo o que foi falado, foidito...”

Autor(a) Desconhecido(a)

RESUMO

A Ilha da Trindade localiza-se a aproximadamente 1.140 km da costa do estado do Espírito Santo e representa a última manifestação vulcânica do Brasil (3.9 – 0,25 Ma), com predomínio de rochas subsaturadas em SiO₂. A ilha divide as bacias sedimentares de Campos e Espírito Santo, duas importantes produtoras de petróleo, e é composta por 5 unidades geológicas, da base para o topo: Complexo Trindade, Sequência Desejado, Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Vulcão do Paredão. O Complexo Trindade apresenta rochas vulcanoclásticas a hipabissais, tais como diques, *necks* e *plugs* de composição predominantemente fonolítica, ocorrendo também nefelinitos e lamprófiros. O aumento do interesse no entendimento de rochas vulcânicas em sistemas petrolíferos promove a investigação acerca da porosidade dessas rochas, que podem se comportar como rochas selantes, reservatório ou influenciar na maturação térmica de rochas geradoras imaturas. O objetivo deste trabalho é qualificar a porosidade das rochas subvulcânicas estudadas para o Complexo Trindade, com foco nos padrões de porosidade, e avaliar os corpos hipabissais quanto à possibilidade de pertencer a sistemas petrolíferos não convencionais. Para isso, foi realizado campo no local, coleta, seleção e laminação de amostras, descrição em microscópio petrográfico e análise em microtomografia computadorizada de raios X. A petrografia definiu 3 classes modais (fonólitos, lamprófiros e feldspatoiditos) e 6 diferentes litofácies coerentes: fonólitos maciços (Pm), fonólitos vesiculados (Pv), lamprófiros amigdaloides (La), lamprófiros maciços (Lm), feldspatoiditos fraturados (F) e nefelinitos vesiculados (Fv). A porosidade primária nessas rochas é exclusivamente vesicular e variam em volume de acordo com a composição e tipo de *emplacement*. Na litofácies Pv, as vesículas são pequenas (< 2mm), estiradas e irregulares quanto à forma, abrigando porosidade em torno de 2-4%. A litofácies La apresenta amígdalas de dimensões esféricas a achatadas, completamente preenchidas por minerais secundários. A litofácies Ff possui porosidade por fraturas que podem condicionar a permeabilidade. As litofácies Lm, Pm e La não apresentam porosidade aparente. O microtomógrafo permitiu a visualização 3D das rochas em 5 litofácies. A análise identificou zonas esféricas de baixa densidade nas fácies Pm e Ff, litofácies descritas petrograficamente como maciças. As vesículas/amígdalas são espaçadas e não mostram conexão aparente. A quantificação 2D em lâminas delgadas associada à qualificação 3D em microtomógrafo permitiu inferir os padrões de porosidade nas rochas subvulcânicas do Complexo Trindade, divididos com base na porosidade atual em 2 grupos: porosos e não porosos. Rochas sem porosidade primária original (Pm, Lm e Ff) possuem estrutura maciça a fraturada e estão condicionados pela colocação em *necks* e *plugs* (Pm) ou diques finos (<1m) de baixa viscosidade (Lm e Ff). Rochas originalmente porosas (La, Fv e Pv) também intrudem na forma de diques pouco espessos. Portanto, as litofácies Pm, Pv, La e Lm possuem atributos para rochas selantes em sistemas petrolíferos análogos, enquanto que Fv e Ff poderiam abrigar uma rocha reservatório.

Palavras-Chave: Ilhas Vulcânicas, Microtomografia de Raios X, Reservatórios Não Convencionais;

ABSTRACT

Trindade Island is located approximately 1,140 km off the coast of Espírito Santo state and is the last volcanic episode in Brazil (3.9 – 0.25 Ma), with a predominance of rocks undersaturated in SiO₂. The island divides the sedimentary basins of Campos and Espírito Santo, two important oil producers, and is composed of 5 geological units, from the base to the top: Trindade Complex, Desejado Sequence, Morro Vermelho Formation, Valado Formation and Paredão Volcano. The Trindade Complex has volcanoclastic to hypabyssal rocks, such as dykes, necks and plugs of predominantly phonolitic composition, also occurring nephelinites and lamprophyres. The increased interest in the understanding of volcanic rocks in petroleum systems promotes research into the porosity of these rocks, which can behave as cap rocks, reservoirs or influence the thermal maturation of immature source rocks. The objective of this work is to qualify the porosity of the subvolcanic rocks studied for the Trindade Complex, focusing on porosity patterns, and to evaluate the hypabyssal rocks for the possibility of belonging to unconventional petroleum systems. For this, a field trip was carried out, collection, selection and lamination of samples, description in a petrographic microscope and analysis in X-ray computed microtomography. The petrography defined 3 modal classes (phonolites, lamprophyres and foidites) and 6 different coherent lithofacies: massive phonolites (Pm), vesiculated phonolites (Pv), amygdaloid lamprophyres (La), massive lamprophyres (Lm), fractured foidites (Ff) and nephelinites. vesiculated (Fv). The primary porosity in these rocks is exclusively vesicular and varies in volume according to the composition and type of emplacement. In the Pv lithofacies, the vesicles are small (< 2mm), stretched and irregular in shape, harboring porosity around 2-4%. The lithofacies La has spherical to flat amygdales, completely filled with secondary minerals. The lithofacies Ff has porosity due to fractures that can affect permeability. Lm, Pm and La lithofacies have no apparent porosity. The microtomograph allowed the 3D visualization of the rocks in 5 lithofacies. The analysis identified low density spherical zones in the Pm and Ff facies, lithofacies petrographically described as massive. The vesicles/amygdales are spaced apart and show no apparent connection. The 2D quantification in thin sections associated with the 3D qualification in microtomography allowed to infer the porosity patterns in the subvolcanic rocks of the Trindade Complex, divided based on the current porosity into 2 groups: porous and non-porous. Rocks without original primary porosity (Pm, Lm and Ff) have a massive to fractured structure and are conditioned by emplacement in necks and plugs (Pm) or thin dikes (<1m) of low viscosity (Lm and Ff). Originally porous rocks (La, Fv and Pv) also intrude in the form of thin dykes. Therefore, the lithofacies Pm, Pv, La and Lm have attributes for cap rocks in analogous petroleum systems, while Fv and Ff could harbor a reservoir rock.

Keywords: Volcanic Islands, X-Ray Microtomography, Unconventional Reservoirs;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização da Ilha da Trindade, Brasil, e seção batimétrica ao longo da Cadeia Vitória-Trindade. O arquipélago de Trindade e Martim Vaz é a única porção da Cadeia Vitória-Trindade acima do nível do mar.22
- Figura 2 - Distribuição de platôs oceânicos fanerozoicos, cadeias de montanhas assísmicas e grandes províncias ígneas (GPI's), com destaque em vermelho para a Cadeia Vitória Trindade (VTR – Vitória-Trindade Ridge).23
- Figura 3 - Mapa geológico simplificado das 5 unidades geológicas da Ilha da Trindade.26
- Figura 4 - Modelo convencional para sistemas petrolíferos. Um sistema é composto por (1) rocha geradora, (2) rocha reservatório, (3) rocha selante e (4) trapa ou armadilha.....29
- Figura 5 - A porosidade e permeabilidade dependem do tipo de manifestação vulcânica e de suas litofácies.31
- Figura 6 - Comparação microscópica de tipos de porosidade primária e secundária em rochas vulcânicas e sedimentares. As lâminas delgadas estão impregnadas com resina azul. A) Textura em peneira em plagioclásios, formando porosidade primária intrapartícula em basalto. B) Porosidade primária deposicional preservada em arenito quartzarenito. C) Porosidade primária controlada pela vesiculação em nefelinito. D) Porosidade secundária gerada pela dissolução total de oólitos em calcarenito. E) Porosidade móldica em gabro, permitindo porosidade com faces retas. F e G) Porosidade por fraturamento externo e/ou interno às partículas. H) Calcário rico em briozoários com porosidade intrapartícula. I) Cristal de feldspato alcalino com dissolução interna.33
- Figura 7 - Diagrama QAPF para classificação modal de rochas vulcânicas. Q=quartzo; A=feldspato alcalino; P=plagioclásio; F=feldspatoide.....35
- Figura 8 - Microtomógrafo de raios X (A). O equipamento emite raios X pela amostra que está presa a um suporte com cera (B). O detector (C) processa os dados e compila as imagens.43
- Figura 9 - Rochas subvulcânicas do Complexo Trindade. Os fonólitos podem se apresentar na forma de necks e plugs (A) ou diques (B). Os lamprófiros (C) e os nefelinitos (D) intrudem exclusivamente sob forma de diques. fn = fonólitos; lp = lamprófiros; nl = nefelinitos.....47
- Figura 10 – Fotomicrografias de fonólitos do Complexo Trindade. Os fonólitos possuem fenocristais de sanidinas (A, B e E), nefelinas (B e F), sodalita poiquilítica (A), piroxênios (D) e anfibólios (D). Enclaves máficos (C) ocorrem em todas as rochas em meio à matriz traquítica (C e E). ll=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; px=piroxênio; af=anfibólio; nf=nefelina; sn=sanidina; sd=sodalita. Amostras: A) APA-02; B) APA-04; C e E) APA-06; D) DIQ-05; F) APA-16;49

Figura 11 - Fotomicrografias de feldspatoiditos do Complexo Trindade. Os nefelinitos (A, B, C, E e F) possuem fenocristais principalmente de nefelina (C e E) e piroxênios (A, B, C, D, E e F). O sodalito (D) possui piroxênios e sodalitas como fenocristais principais. Os feldspatoiditos possuem cristais de olivinas (B e D) completamente alterados. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; px=piroxênio; nf=nefelina; ol=olivina. Amostras: A) DIQ-01; B e C) DIQ-02; D) DIQ-03; E) DIQ-06; F) DIQ-04;.....51

Figura 12 - Fotomicrografias de lamprófiros do Complexo Trindade. Os lamprófiros são hipocristalinos e possuem fenocristais de piroxênio (A, B e D), apatita (B e D) anfibólio (A) e biotita (C). Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; ap=apatita; px=piroxênio; bt=biotita; af=anfíbólio. Amostras: A e B) APA-10; C e D) DIQ-07;.....53

Figura 13 - Fotomicrografias da litofácies fonólitos maciços (Pm). As rochas não possuem nenhum tipo de porosidade primária. As linhas vermelhas tracejadas indicam a microporosidade secundária móldica local (A). Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostras: A) APA-02; B) APA-06; C) APA-04; D) APA-17;56

Figura 14 - Fotomicrografias da litofácies fonólitos vesiculados (Pv). As linhas vermelhas tracejadas indicam a porosidade vesicular original, com preenchimento parcial secundário. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: DIQ-05.57

Figura 15 - Fotomicrografias da litofácies lamprófiros maciços (Lm). As rochas não possuem nenhum tipo de porosidade aparente. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostra: APA-10.....58

Figura 16 - Fotomicrografias da litofácies lamprófiros amigdaloides (La). As linhas vermelhas tracejadas indicam a porosidade vesicular original, com preenchimento secundário total. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: DIQ-07.59

Figura 17 - Fotomicrografias da litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff). Os nefelinitos (A e B) e os sodalitos (B e C) possuem estrutura fraturada. Porosidade intrapartícula (C) e artefato (D) são encontradas localmente. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: A) DIQ-01; C) DIQ-06; B e D) DIQ-03;60

Figura 18 - Fotomicrografias da litofácies nefelinitos vesiculados (Fv). As linhas vermelhas tracejadas indicam a elevada porosidade vesicular preservada. Il=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostra: DIQ-04.....61

Figura 19 - Reconstrução 3D (D) da litofácies fonólitos maciços (Pm) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A amostra é homogênea e não há indícios de porosidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-06.....64

Figura 20 - Reconstrução 3D da litofácies fonólitos vesiculados (Pv) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha possui vesículas não conectadas. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-02.65

Figura 21 - Reconstrução 3D da litofácies lamprófiros maciços (Lm) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha é densa e homogênea e não há indícios de porosidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-10.....66

Figura 22 - Reconstrução 3D da litofácies lamprófiro amigdalóide (La) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha possui densidade elevada e amígdalas preenchidas por minerais de baixa densidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: DIQ-07.....68

Figura 23- Reconstrução 3D da litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. As zonas de baixa densidade são geradas provavelmente pelas sodalitas. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: DIQ-03.....69

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação das rochas ígneas quanto ao teor de minerais máficos (M) e de minerais máficos escuros (M'). | 36 |
| Tabela 2 - Classificação das rochas ígneas quanto à granulação com base em aspectos macroscópicos e microscópicos. | 37 |
| Tabela 3 - Dados de campo das 14 amostras subvulcânicas estudadas no Complexo Trindade. | 46 |
| Tabela 4 - Amostras e litofácies analisadas em microtomografia computadorizada de raios X. | 62 |
| Tabela 5 - Padrões de porosidade atuais para as litofácies subvulcânicas do Complexo Trindade. | 73 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Classificação de lamprófiros conforme conteúdo de minerais félsicos e ferro-magnesianos. | 36 |
| Quadro 2 - Litofácies descritas para o Complexo Trindade. | 55 |
| Quadro 3 - Relação de litofácies com a porosidade original e o modo de colocação das rochas subvulcânicas estudadas. | 75 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----|---|
| af | Anfibólio |
| ap | Apatita |
| BR | Brasil |
| bt | Biotita |
| CT | Complexo Trindade |
| CVT | Cadeia Vulcânica Vitória-Trindade |
| EUA | Estados Unidos da América |
| fn | Fonólitos |
| FMV | Formação Morro Vermelho |
| FV | Formação Valado |
| lp | Lamprófios |
| MCT | Microtomógrafo Computadorizado de Raios X |
| nf | Nefelina |
| nl | Nefelinitos |
| | Luz Polarizada Perpendicular |
| + | Luz Polarizada Paralela |
| ol | Olivina |
| px | Piroxênio |
| sn | Sanidina |
| SD | Sequência Desejado |
| sd | Sodalita |
| VP | Vulcão do Paredão |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 Caracterização do Problema..... | 18 |
| 1.2 Premissas e Hipóteses..... | 18 |
| 1.3 Justificativa..... | 19 |
| 1.4 Objetivos..... | 20 |
| 1.5 Localização da Área de Estudo..... | 21 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 23 |
| 2.1 Ilhas Oceânicas..... | 23 |
| 2.1.1 <i>Ilhas Vulcânicas</i> | 24 |
| 2.1.2 <i>Plataforma Sul-Americana</i> | 24 |
| 2.1.3 <i>Ilha da Trindade</i> | 25 |
| 2.2 Rochas Ígneas e Sistemas Petrolíferos..... | 27 |
| 2.2.2 <i>Reservatórios Não Convencionais</i> | 29 |
| 2.2.3 <i>Permo-Porosidade</i> | 30 |
| 2.3 Descrição de Rochas Ígneas..... | 34 |
| 2.3.1 <i>Classificação Modal e Textural</i> | 34 |
| 2.3.2 <i>Rochas Alcalinas Subsaturadas</i> | 37 |
| 2.3.3 <i>Intrusões Cilíndricas</i> | 38 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 40 |
| 3.1 Etapa Pré-campo..... | 40 |
| 3.2 Etapa de Campo..... | 40 |
| 3.3 Etapa Pós-campo..... | 40 |
| 3.3.1 <i>Compilação dos Dados de Campo</i> | 41 |
| 3.3.2 <i>Seleção das Amostras</i> | 41 |
| 3.3.3 <i>Corte das Amostras e Laminação</i> | 41 |
| 3.3.4 <i>Petrografia</i> | 42 |
| 3.3.5 <i>Microtomografia de Raios-X</i> | 42 |
| 3.3.6 <i>Tratamento dos Dados</i> | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 4. RESULTADOS | 45 |
| 4.1 Descrição de Campo | 45 |
| 4.2 Descrição Microscópica | 47 |
| 4.2.1 Fonólitos..... | 48 |
| 4.2.2 Feldspatoiditos | 50 |
| 4.2.3 Lamprófiros..... | 52 |
| 4.3 Litofácies | 54 |
| 4.4 Microtomografia Computadorizada de Raios X | 62 |
| 5. DISCUSSÕES..... | 70 |
| 5.1 Modos de Colocação e Composições..... | 70 |
| 5.2 Microtomografia Computadorizada de Raios x..... | 71 |
| 5.3 Padrões de Porosidade | 73 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 76 |
| REFERÊNCIAS..... | 78 |

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordados a caracterização do problema, as premissas e hipóteses discutidas, a justificativa para a realização desta pesquisa, os objetivos gerais e específicos e a localização da área deste estudo.

1.1 Caracterização do Problema

O estudo de sistemas vulcânicos em bacias sedimentares e em manifestações vulcânicas de margens continentais tem sido utilizado para compreender reservatórios de hidrocarbonetos em sistemas não convencionais, além da sua relação com a tectônica e a maturação de sistemas petrolíferos tradicionais. Pesquisas e investigações têm enfatizado a importância da identificação das associações de fácies e os padrões petrofísicos em rochas vulcânicas e hipabissais para a modelagem estratigráfica e prospecção de hidrocarbonetos (MARK *et al.*, 2018; BECKER *et al.*, 2019; FORNERO, *et al.*, 2019; JERRAM *et al.*, 2019; ROSSETTI *et al.*, 2019). A busca por estes dados deve-se ao fato da importância da ocorrência de rochas vulcânicas em bacias petrolíferas no mundo (PLANKE *et al.*, 2005; FAROOQUI *et al.*, 2009; WANG & CHEN, 2015; MAGEE *et al.*, 2016; FORNERO *et al.*, 2019) e da dificuldade de caracterizá-las, sendo o levantamento geológico realizado especialmente por geofísica e/ou geoquímica de poços. Nessas bacias, os produtos vulcânicos e subvulcânicos atuam como selantes, reservatórios ou indutores de calor para maturação de matéria orgânica. Estes fatos despertam o interesse na investigação de sistemas vulcânicos aflorantes e análogos para estabelecer modelos de associações de fácies e padrões de porosidade que possam ser comparados com sistemas vulcânicos e hipabissais não-aflorantes.

1.2 Premissas e Hipóteses

Tem-se como hipótese que o sistema permo-poroso dos diques, *necks* e *plugs* do Complexo Trindade é predominantemente primário e vesicular, com valores insignificantes (HYNE, 2012) de porosidade absoluta, e que estas rochas poderiam compor um modelo de sistema selo-reservatório em profundidade. Esta hipótese foi formulada a partir das seguintes premissas:

- a. A porosidade primária em lavas e rochas subvulcânicas pode ser (1) vesicular, formada pela volatilização durante o *emplacement* ou (2) intracristalina/intrapartícula, gerada por dissolução cristalina decorrente dos processos sin-magmáticos. A porosidade secundária pode ser originada pelo fraturamento pós-*emplacement* ou pela dissolução da mineralogia primária.
- b. Corpos subvulcânicos tendem a ter baixos valores de porosidade e fácies predominantemente maciça. A idade relativamente jovem do Complexo Trindade e consequente alto grau de preservação dessas rochas corrobora para uma porosidade primária dominante.
- c. Em um sistema petrolífero, rochas selos devem ser pouco porosas e pouco permeáveis para que a migração de fluidos seja bloqueada e o óleo concentrado (MILANI *et al.*, 2000). Rochas intrusivas podem agir como selo se colocadas acima de rochas reservatório e apresentarem continuidade lateral e geometria concordante (soleiras).

1.3 Justificativa

O fraturamento e vesiculação de rochas vulcânicas podem abrigar importantes reservatórios de água e óleo, como ocorre em sistemas petrolíferos e aquíferos de várias localidades, e trazer implicações importantes acerca dos constituintes primários e secundários condicionantes dos reservatórios. A raridade de encontrar sistemas vulcânicos expostos e preservados, ainda mais tratando-se de rochas alcalinas, é uma grande vantagem para estudos de porosidade, visto que, em bacias sedimentares, esses estudos geralmente são realizados por métodos indiretos. O estudo de diferentes litologias na Ilha da Trindade permitirá sugerir (1) os processos vulcânicos que atuam na formação da cadeia Vitória-Trindade e que delimitam e condicionam as bacias sedimentares adjacentes e (2) as características do material que está sendo erodido e conseqüentemente depositado no assoalho oceânico.

O estudo das propriedades físicas das rochas vulcanoclásticas foram recentemente estudadas por Pasqualon *et al.* (2019) para o Vulcão do Paredão, Ilha da Trindade. Entretanto, os estudos de litofácies e padrões de porosidade para rochas subvulcânicas/hipabissais são raros e ainda não foram realizados na ilha. O Complexo

Trindade é ideal para esse tipo de estudo por possui o maior volume de rochas da ilha e apresentar diferentes composições. O foco no Complexo Trindade permitirá (1) abranger a maior quantidade de diferentes padrões de porosidade e (2) compreender os processos de ascensão de magmas e a relação do *emplacement* e geometria dos sistemas intrusivos com as rochas encaixantes. A caracterização desses sistemas permo-porosos poderá ser utilizada como análogo para intrusões alcalinas em bacias sedimentares de todo o mundo. A interpretação dos resultados auxiliará na possível prospecção de recursos não convencionais ou no entendimento do comportamento ou influência dessas rochas em sistemas petrolíferos. Além disso, por ser juntamente com a ilha de Martim Vaz o último território a leste do Brasil, os estudos e pesquisas na Ilha da Trindade promovem a valorização da costa brasileira e consolidação das águas nacionais navegáveis.

1.4 Objetivos

Neste trabalho, propõe-se a investigação das propriedades físicas das rochas subvulcânicas pertencentes ao Complexo Trindade (3.9 – 1,1 Ma). O Complexo Trindade apresenta grande volume de rochas piroclásticas e de rochas subvulcânicas encontradas sob forma de diques, *necks* e *plugs* de composições variadas. A análise litofaciológica e estimativa dos padrões de porosidade destes corpos subvulcânicos auxiliarão na caracterização do magmatismo da Ilha da Trindade.

O objetivo geral do trabalho é caracterizar a porosidade das rochas subvulcânicas do Complexo Trindade, Ilha da Trindade. Os objetivos específicos pretendem:

- a. Definir as variações existentes nas rochas subvulcânicas do Complexo Trindade com base em dados de campo, petrografia e litofaciologia;
- b. Caracterizar e quantificar os tipos de porosidade das rochas estudadas por meio de análises 2D e 3D;
- c. Procurar por meio de análises 2D e 3D ligações efetivas entre os poros que indiquem a capacidade para permeabilidade do sistema;

- d. Integrar dados de petrografia, análise 2D e 3D para avaliação do sistema permo-poroso do Complexo Trindade e proposição de um modelo que integre os padrões de porosidade com sistemas petrolíferos.

1.5 Localização da Área de Estudo

Na margem continental brasileira, ocorrem diversas manifestações vulcânicas relativamente jovens (Mioceno-Pleistoceno), segundo Ulbrich *et al.* (2004), pós-abertura do Oceano Atlântico, tais como os arquipélagos Fernando de Noronha e Trindade e Martim Vaz. A Ilha da Trindade, segundo Pires *et al.* (2016), possui idades de 3,9 – 0,25 Ma e localiza-se no Atlântico Sul, a aproximadamente 1140 quilômetros da costa do estado do Espírito Santo, Brasil. A ilha compõe, juntamente com a ilha de Martim Vaz e algumas ilhotas, o arquipélago de Trindade e Martim Vaz. O arquipélago representa a última manifestação vulcânica brasileira conhecida e o extremo leste do território nacional.

O arquipélago de Trindade e Martim Vaz é a porção emersa da cadeia vulcânica submarina Vitória-Trindade (Figura 1), que se estende até o continente e limita duas importantes bacias petrolíferas brasileiras: Bacia de Campos e Bacia do Espírito Santo. O magmatismo da Ilha da Trindade possui exposição de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas essencialmente subsaturadas em SiO₂ com afinidade geoquímica alcalina sódica (MARQUES *et al.*, 1999). Foram descritas 5 unidades geológicas, da base para o topo (ALMEIDA, 1961): Complexo Trindade (CT), Sequência Desejado (SD), Formação Morro Vermelho (FMV), Formação Valado (FV) e Vulcão do Paredão (VP).

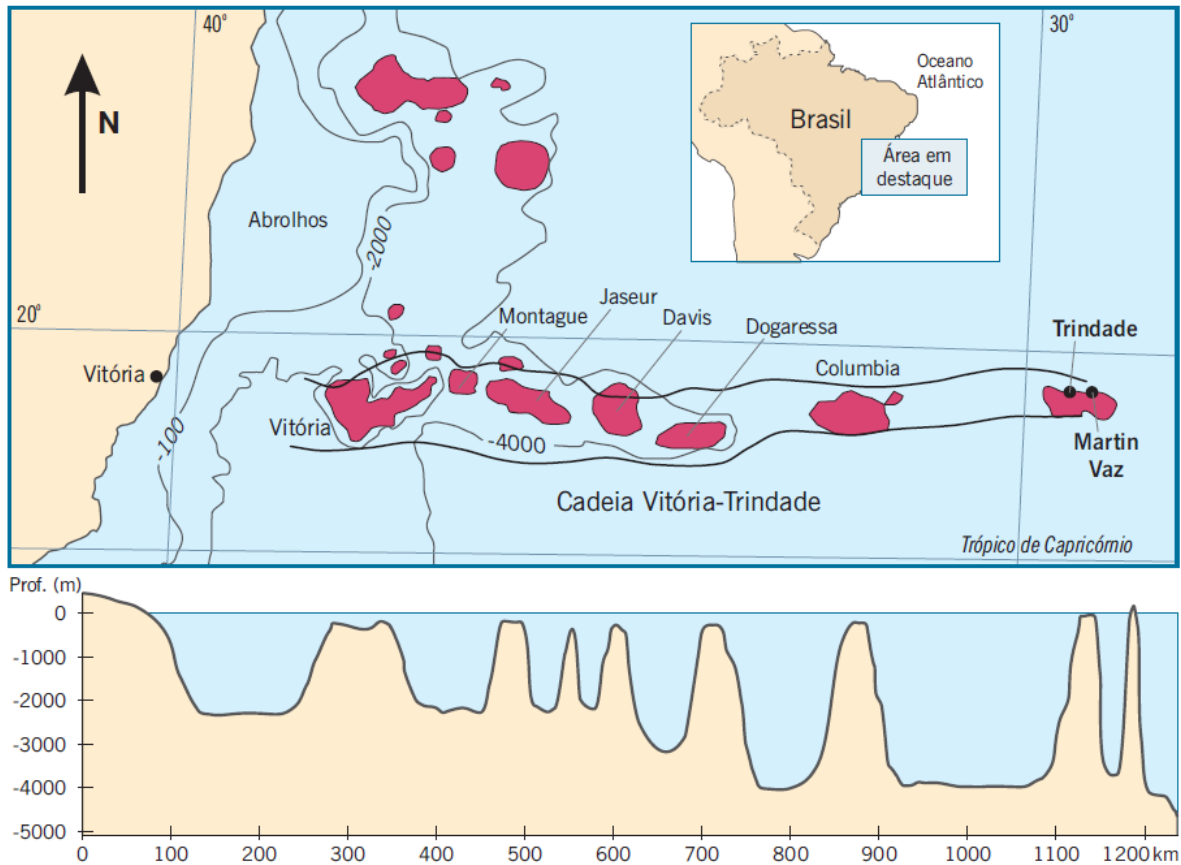


Figura 1 - Localização da Ilha da Trindade, Brasil, e seção batimétrica ao longo da Cadeia Vitória-Trindade. O arquipélago de Trindade e Martim Vaz é a única porção da Cadeia Vitória-Trindade acima do nível do mar.

Fonte: Extraído de Almeida, 2006.

2. ESTADO DA ARTE

O estado da arte irá apresentar um breve contexto de ilhas oceânicas, rochas ígneas e suas relações com sistemas petrolíferos e tipos de descrição e classificação dessas rochas.

2.1 Ilhas Oceânicas

Ilhas oceânicas são corpos rochosos dispostos como cristas e/ou cadeias vulcânicas que se elevam quilômetros acima da base do fundo do mar, podendo superar o nível do mar (KERR, 2014). A maioria dessas cristas são traços de *hotspots* (e.g. Walvis, Atlântico Sul), enquanto outras podem ser (1) fragmentos rifteados de crosta continental e possuir base granítica (e.g. Lord Howe Rise, norte da Nova Zelândia e The Agulhas Plateau, sul da África) ou (2) arco oceânico extinto (e.g. Palau-Kyushu Ridge, sul do Japão). Cerca de 10% dos fundos oceânicos estão cobertos (Figura 2) por platôs oceânicos e cadeias de montanhas assísmicas (KERR, 2014; CONDIE, 2017; 2021).

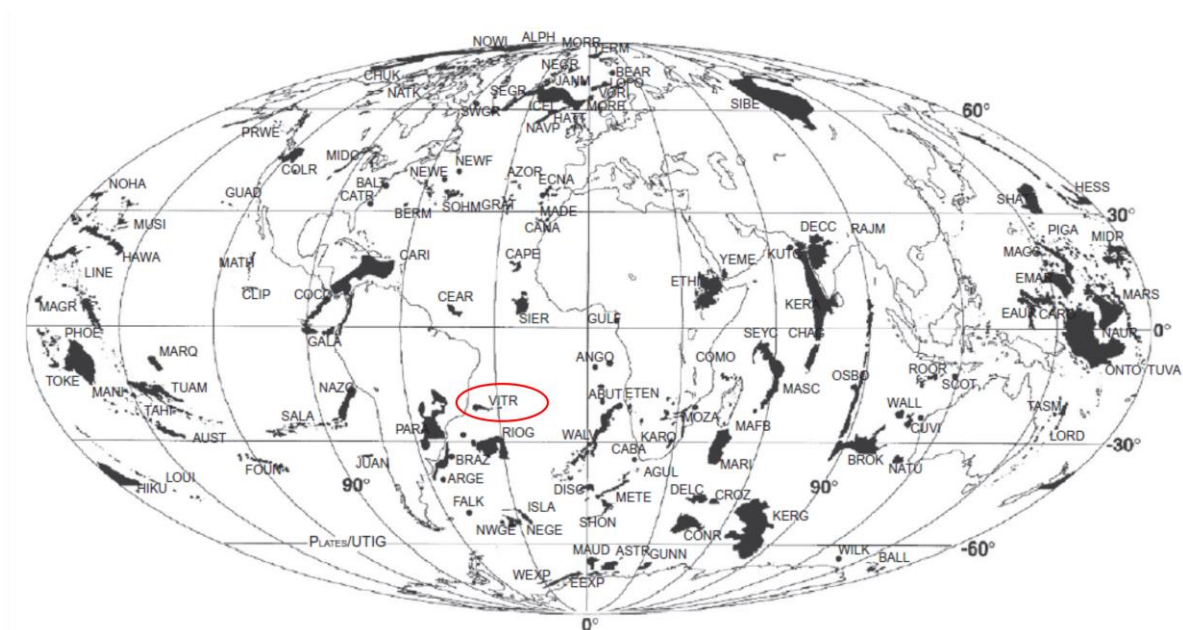


Figura 2 - Distribuição de platôs oceânicos fanerozoicos, cadeias de montanhas assísmicas e grandes províncias ígneas (GPI's), com destaque em vermelho para a Cadeia Vitória-Trindade (VTR – Vitória-Trindade Ridge).

Fonte: Modificado de Condie (2021).

2.1.1 Ilhas Vulcânicas

Ilhas oceânicas vulcânicas ocorrem em bacias oceânicas de todo o mundo, próximas ou não a cadeias meso-oceânicas (CONDIE, 2021). A espessura de crosta em ilhas vulcânicas pode variar conforme a localidade, embora se estime que tenha de 10 a 20 quilômetros (CONDIE, 2017; 2021).

A geração de magmatismo em ilhas vulcânicas é comumente associada a plumas mantélicas, isto é, anomalias quentes fixas de baixa densidade que ascendem do manto e registram vulcanismo intraplaca (*hotspots*) que migra em superfície paralelamente à direção do movimento de placas (WILSON, 1963; MORGAN, 1971; CONDIE, 2001). Esse magmatismo tende a formar rochas alcalinas subsaturadas em SiO₂, devido ao processo profundo de fusão do manto enriquecido (MARQUES *et al.*, 1999). Os *hotspots* têm uma distribuição global irregular e manifestam-se em litosfera oceânica na forma de ilhas oceânicas e/ou cadeias de montanhas submersas alinhadas, como no Havaí (EUA) e em Trindade (BR), ou em litosfera continental, como Yellowstone (EUA) e Itatiaia (BR), na qual nem sempre as relações de continuidade são claras. Evidências crescentes indicam que rochas alcalinas estão eventualmente ligadas espacialmente e temporalmente a Grandes Províncias Ígneas (Large Igneous Provinces–LIP's), como nas províncias do Deccan, Siberian Traps e Paraná-Etendeka (ERNST; BELL, 2009). Mais raramente, podem ocorrer em limites convergentes de placas (BONIN *et al.*, 1998; HOU *et al.*, 2006).

2.1.2 Plataforma Sul-Americana

A abertura do oceano Atlântico se deu pela separação entre as placas litosféricas da América do Sul e a África, associada à ruptura do paleocontinente Gondwana. O desenvolvimento de um sistema rifte do Jurássico inferior ao Cretáceo superior gerou manifestação de lavas basálticas e seus sistemas intrusivos, posteriormente seccionados por falhas transformantes (WILSON, 1965; ASMUS; PORTO, 1980; ALMEIDA, 2006). Há evidências de esforços extensionais polifásicos em várias regiões da placa sul-americana (MOHRIAK, 2003). O espalhamento de crosta e surgimento dessas falhas criam zonas de fratura, representando zonas frágeis da litosfera oceânica (ALMEIDA, 2006). As zonas frágeis sem tectônica ativa

podem atuar como condutos de magmas quando associadas a *hotspots*, formando ilhas emersas, *guyots* submarinos e/ou *atolls*.

A Zona de Fratura Vitória-Trindade está diretamente ligada à geração dessas falhas transformantes que seccionam a orientação (N-S) do rifte. Fazem parte desse sistema de geração os arquipélagos de Fernando de Noronha, Abrolhos e de Trindade e Martim Vaz. O magmatismo que percola a zona (Figura 1) gera a Cadeia Vitória-Trindade (CVT). A cadeia Vitória-Trindade é constituída por uma série de *guyots* e montes submarinos descontínuos com forma predominantemente alongada e de orientação aproximadamente E-W (ALMEIDA, 2002; 2006). Segundo Thomaz-Filho *et al.* (2005), o continente sul-americano se deslocou sobre esse ponto quente desde o alinhamento das rochas alcalinas continentais de Poços de Caldas–Cabo Frio até a Cadeia Vitória–Trindade. Gibson *et al.* (1995; 1997) e Thompson *et al.* (1998) sugerem que a pluma de Trindade teve início há 90-85 Ma com o magmatismo das Províncias Ígneas de Alto Paranaíba e Iporá.

2.1.3 Ilha da Trindade

A Ilha da Trindade localiza-se no Oceano Atlântico Sul e está a aproximadamente 1.140 km da costa do estado do Espírito Santo, entre os paralelos de 20° 29' S e 20° 31,7' S e os meridianos de 29° 17,7' W e 29°20,7' W, e faz parte do arquipélago de Trindade e Martim Vaz. A Ilha faz parte da cadeia vulcânica Vitória-Trindade (CVT) e representa o último território brasileiro a leste do continente, assim como a manifestação vulcânica mais recente do país e da CVT. A ilha foi definida com base em levantamentos sísmicos (ALMEIDA, 2006 *apud* GUAZELLI; CARVALHO, 1978) ao longo da Zona de Fratura Vitória-Trindade. Esses montes/*guyots* podem ser encontrados a menos de 100 metros de profundidade (ALMEIDA, 2006 *apud* GORINI, 1969) e a partir de 175 quilômetros da costa do estado do Espírito Santo, no talude continental. A geração dessas elevações, e consequentemente da Ilha da Trindade, se dá por importante atividade magmática gerada por *hotspot* (MINSTER *et al.*, 1974; GIBSON *et al.*, 1997; SIEBEL *et al.*, 2000) no Cenozoico ao longo de falhas reativadas (ALMEIDA, 2006).

A ilha foi descrita e subdividida (ALMEIDA, 1961) em 5 unidades geológicas (Figura 3), da base para o topo: Complexo Trindade (CT), Sequência Desejado (SD), Formação Morro Vermelho (FMV), Formação Valado (FV) e Vulcão do Paredão (VP).

O Complexo Trindade, a base da ilha e do sistema de alimentação, é visualmente identificado pelos grandes *necks* e *plugs* fonolíticos expostos tanto nas margens da ilha como em corpos ígneos de grandes elevações, como o Pico do Monumento (~470m). O CT, cujas idades variam de 3,9 – 1,1 Ma pelo método Ar/Ar (PIRES *et al.*, 2016) e K/Ar (CORDANI, 1970), é composto por depósitos vulcanoclásticos de composição fonolítica a melanefelinítica e intrusões hipabissais de diques, *necks* e *plugs* de composição predominantemente fonolítica, ocorrendo também lamprófiros, melanefelinitos e basanitos (PASQUALON *et al.*, 2019).

A Sequência Desejado (SD), cujas idades variam de 2,6 – 1,5 Ma pelo método K/Ar (CORDANI, 1970), cobrem a parte central da Ilha da Trindade (PASQUALON *et al.*, 2019) e consiste em uma sucessão de derrames fonolíticos a nefeliníticos de aproximadamente 20 metros e intrusões (Pico do Desejado) intercaladas com rochas piroclásticas, como tufos e lapilitos, de mesma composição (ALMEIDA, 1961; 2006).

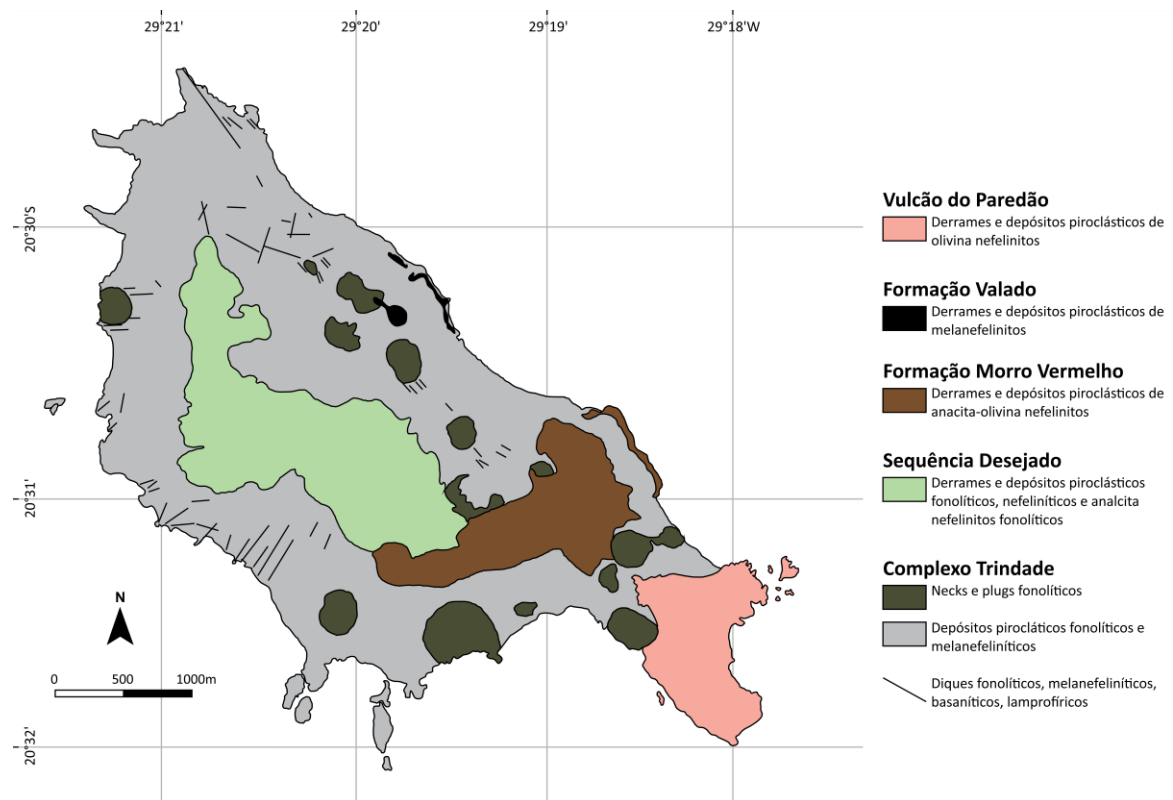


Figura 3 - Mapa geológico simplificado das 5 unidades geológicas da Ilha da Trindade.

Fonte: Modificado de Almeida (1961; 2002); Pasqualon *et al.* (2019).

A Formação Morro Vermelho (FMV) representa um vulcanismo explosivo monogenético exposto na fração centro-leste da ilha, com exposição de sequências piroclásticas (ALMEIDA, 1961). A FMV também apresenta derrames e diques de composição nefelinítica que possuem idades de 1,2 Ma, segundo método Ar/Ar em diques (PIRES *et al.*, 2016).

A Formação Valado (FV) é exposta somente na parte centro norte da ilha a partir de rochas piroclásticas e derrames de composição nefelinítica. A unidade indica fraturamento e posterior preenchimento por magmas bastante fluidos (ALMEIDA, 1961; 2006), gerando um episódio de curta duração. As idades para a Formação Valado ainda são discutíveis. Entretanto, a litoestratigrafia, ao que tudo indica, é contemporânea e/ou sobrepõe a Formação Morro Vermelho.

O Vulcão do Paredão (VP) representa a extinta caldeira de um vulcão parcialmente preservado devido à explosão de sua face sudeste. Para o Vulcão do Paredão, foi proposta uma abordagem estratigráfica (PASQUALON *et al.*, 2019) com base nas associações de fácies para interpretação dos processos eruptivos, dispostas em 3 estágios vulcânicos: (1) freatomagmático, (2) estromboliano e (3) hawaiano. As rochas vulcanoclásticas da unidade englobam principalmente composições nefeliníticas, basaníticas e tefríticas (PASQUALON *et al.*, 2019). A unidade também apresenta derrames de olivina nefelinitos (ALMEIDA, 1961; 2006). As idades para o VP são de $0,25 \pm 0,19$ Ma, segundo método Ar/Ar (PIRES *et al.*, 2016), o que torna o Vulcão do Paredão o último vulcanismo ativo em território brasileiro.

Trabalhos publicados acerca da geologia da ilha abordam essencialmente geoquímica, geocronologia e geomorfologia (ALMEIDA, 1961; RYABCHIKOV & KOGARKO, 1994; MARQUES *et al.*, 1999; FODOR; HANAN, 2000; BONGIOLO *et al.*, 2015; PIRES; BONGIOLO, 2016). Recentemente, diversos estudos petrofísicos e estratigráficos vêm sendo realizados na ilha, principalmente para os depósitos vulcanoclásticos.

2.2 Rochas Ígneas e Sistemas Petrolíferos

Neste item, serão abordados conceitos de sistemas petrolíferos, reservatórios não convencionais e permo-porosidade em rochas ígneas.

2.2.1 Caracterização

Rochas ígneas são aquelas formadas a partir da cristalização de magmas em profundidade que ascendem em direção à superfície, adentrando em continentes e bacias oceânicas. Contudo, por muito tempo, as rochas ígneas foram ignoradas dentro de sistemas petrolíferos por não apresentar qualidade para reservatório (FAROOQUI *et al.*, 2009).

Segundo Milani *et al.* (2000), a definição de um sistema petrolífero convencional (Figura 4) compreende a presença e funcionamento simultâneo de quatro elementos: rocha geradora, rocha reservatório, rocha selante e trapa. Esses elementos dependem de dois fenômenos geológicos: migração e sincronismo. A rocha geradora possui granulometria fina e grande quantidade de matéria orgânica, com valores médios de carbono orgânico total (COT) entre 2–8%. A supersaturação dessas rochas em óleo/gás durante a maturação térmica fratura a própria rocha, levando à migração dos fluidos até a rocha reservatório. Em um sistema petrolífero convencional, as rochas reservatório geralmente são sedimentares e devem ser capazes de conter e transmitir fluidos. Portanto, é necessário que as propriedades petrofísicas (porosidade e permeabilidade) sejam adequadas.

Os fluidos são contidos no reservatório devido a uma capa formada pelas rochas selantes. Uma rocha selante deve apresentar pouca ou nenhuma transmissibilidade de fluidos (baixa permeabilidade) e está diretamente ligada ao grau de coesão e/ou granulometria das rochas. No caso de rochas vulcânicas, a classificação da rocha como selante ou reservatório dependerá, além do mencionado, da homogeneidade e preenchimento do sistema permo-poroso, geometria das rochas e continuidade vertical e horizontal. As porosidades típicas para rochas reservatórios (LEVORSEN; BERRY 1967; HYNE 2012) podem ser classificadas como insignificantes (0-5%), pobres (5-10%), razoáveis (10-15%), boas (15-20%) e/ou excelentes (20-25%).

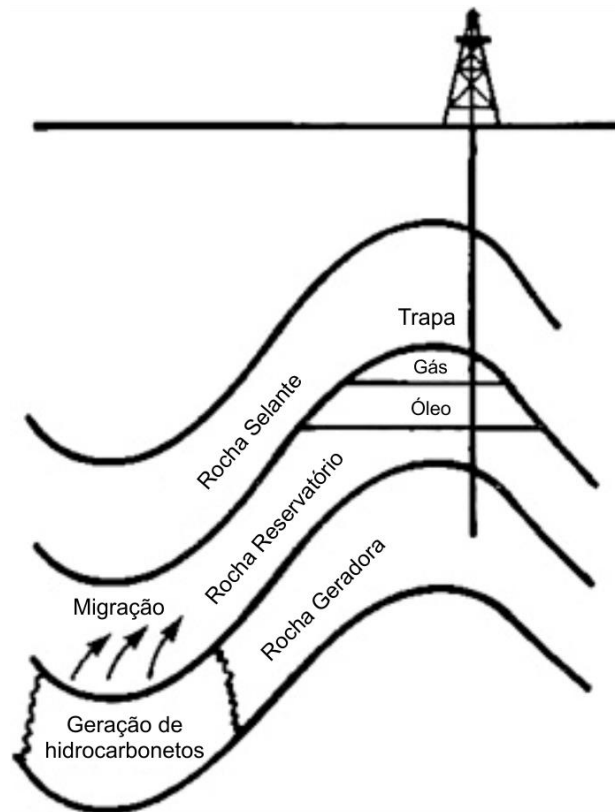


Figura 4 - Modelo convencional para sistemas petrolíferos. Um sistema é composto por (1) rocha geradora, (2) rocha reservatório, (3) rocha selante e (4) trapa ou armadilha.

Fonte: Modificado de Dembicki (2016).

2.2.2 Reservatórios Não Convencionais

Os reservatórios não convencionais, diferentemente dos convencionais, possuem baixa porosidade e permeabilidade. Esse tipo de reservatório abrange (1) *shale gas* e *oil*, (2) *tar sands* ou *oil sands*, (3) *coalbed methane*, (4) hidratos de gás e (5) rochas do embasamento fraturadas ou vulcânicas/vulcanoclásticas. Os reservatórios de água/hidrocarbonetos não convencionais estão relacionados diretamente com as características geológicas da rocha reservatório, e não com o tipo de fluido presente (ANP, 2012; JACOMO, 2014). Neste cenário, as rochas ígneas podem compor extensos reservatórios e gerar produção de grandes volumes de óleo e gás a longo prazo.

Em bacias sedimentares com potencial para geração de hidrocarbonetos, o magmatismo pode alterar a porosidade e pressão hidrostática das rochas encaixantes

(THOMAZ-FILHO *et al.*, 2008), assim como a temperatura e estrutura do sistema petrolífero (CIOCCARI; MIZUSAKI, 2020). A atividade magmática em subsuperfície também pode modificar as camadas pré e pós-existentes, assim como gerar estruturas de migração de petróleo a partir de fraturamento e/ou antigos condutos vulcânicos.

Considerando a teoria orgânica para a origem dos hidrocarbonetos, a influência magmática na geração de óleo e/ou gás em rochas sedimentares imaturas pode se desenvolver de duas principais maneiras: (1) aumento de carga e soterramento das rochas geradoras por espessas sequências vulcânicas, corroborando para a maturação térmica e estabelecimento de um sistema petrolífero típico (MAGOON; DOW, 1994; SCHUTTER, 2003). No Brasil, isso ocorre no Magmatismo Penatecaua, Bacia dos Solimões (BARATA; CAPUTO, 2007); (2) aumento de temperatura das rochas geradoras da bacia por magmatismo intrusivo/hipabissal, gerando um sistema petrolífero atípico, como ocorre nas Formações Mosquito e Sardinha, Bacia do Parnaíba (MIRANDA *et al.*, 2018). A geração e migração de hidrocarbonetos pode posteriormente transformar os sistemas vulcânicos em rochas reservatórios, dependendo de suas propriedades físicas e morfologias.

2.2.3 Permo-Porosidade

O entendimento e definição de estratigrafia e faciologias para rochas vulcânicas e seus sistemas alimentadores é alvo de estudos recentes e auxilia na compreensão dos processos de colocação de lavas e magmas. Após a descoberta de óleo em sistemas vulcânicos, deu-se muita atenção na sua investigação e atividade em bacias sedimentares. O estudo das propriedades físicas surge como ferramenta fundamental para análise do sistema permo-poroso dessas rochas. A porosidade em rochas e depósitos vulcânicos (Figura 5) depende de fatores como (1) tipo de manifestação vulcânica (efusiva ou explosiva), (2) distância do depósito em relação à fonte, (3) composição do magma, (4) tipo de derrame, (5) volatilização do sistema e/ou (6) fragmentação (COLOMBIER *et al.*, 2017; MILLETT *et al.*, 2020), gerando diferentes litofácies. Estudos têm sido bastante desenvolvidos em grandes províncias ígneas (JERRAM *et al.*, 2018; GALLAND *et al.*, 2018; ERNST *et al.*, 2019). No entanto, estes estudos ainda são iniciais na margem continental brasileira.

A porosidade pode ser gerada por processos primários e/ou secundários, e foi primeiramente classificada para descrição de rochas sedimentares carbonáticas (CHOQUETTE; PRAY, 1970). O termo “porosidade primária” inclui toda a porosidade pré-deposicional e deposicional de uma partícula, cristal, sedimento ou rocha (SCHOLLE; ULMER-SCHOLLE, 2003). Os processos secundários de formação de porosidade podem ser definidos (SRUOGA; RUBISTEIN, 2007; BECKER *et al.*, 2019) como aqueles que ocorrem em condições de sistema aberto, após a completa cristalização da rocha, gerando alterações de minerais, metamorfismo, hidrotermalismo e/ou deformação tectônica.

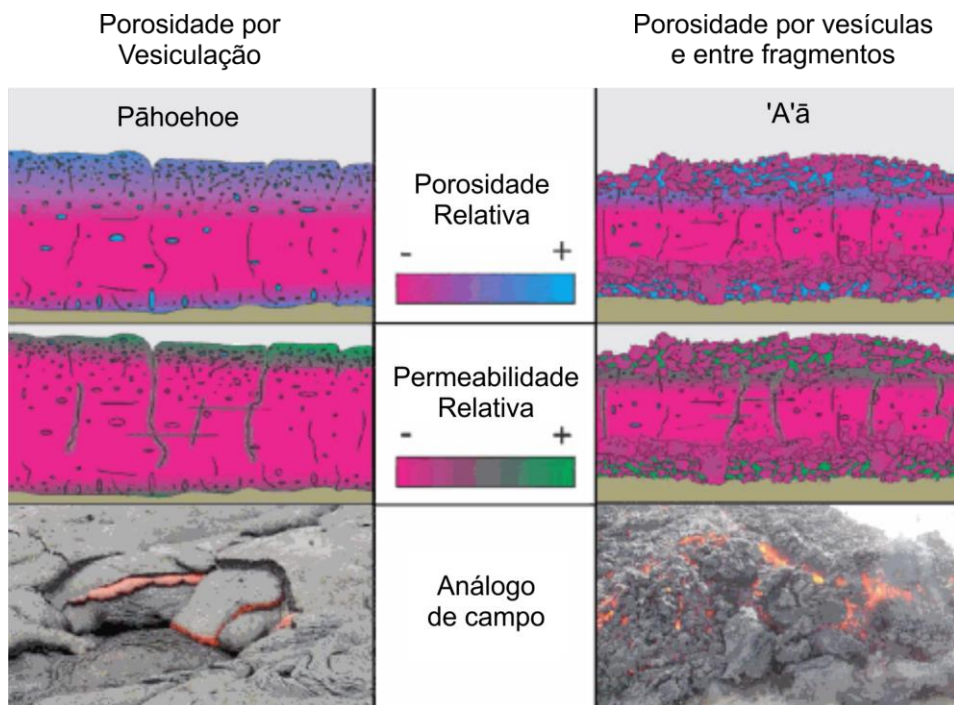


Figura 5 - A porosidade e permeabilidade dependem do tipo de manifestação vulcânica e de suas litofácies.

Fonte: Adaptado de Millett *et al.* (2020).

Em rochas sedimentares, a porosidade primária é principalmente interpartícula/intercristalina (Figura 6), isto é, o espaço poroso entre as partículas constituintes deposicionais. Já a porosidade secundária pode ser controlada pela dissolução seletiva de constituintes originais da rocha, formando porosidade móldica. A porosidade intrapartícula, isto é, porosidade não genética que ocorre em frações dentro de partículas individuais ou grãos de uma rocha, pode ser tanto primária quanto secundária (SCHOLLE; ULMER-SCHOLLE, 2003).

Em rochas vulcânicas, a porosidade primária pode ser definida como aquelas que estão ativas durante o estágio de *emplacement* até o fim da cristalização em sistema fechado (SRUOGA; RUBISTEIN, 2007; MCPHIE, 1993). A porosidade secundária geralmente é restrita ao grau de fraturamento das rochas, hidrotermalismo e substituição mineral ou dissolução parcial ou total de alguns minerais. Algumas rochas vulcanoclásticas, originalmente preservadas, possuem geralmente um grande volume de poros. No caso de rochas hipabissais/subvulcânicas, a principal propriedade que condiciona a porosidade primária, quando presente, é a vesiculação (Figura 6). Segundo Sruoga; Rubistein (2007); Barreto *et al.* (2017), também é possível encontrar porosidade primária intracristalina/intrapartícula, como na textura em peneira dos plagioclásios (*sieved-texture*), gerada pelos próprios processos de ascensão e colocação dos magmas.

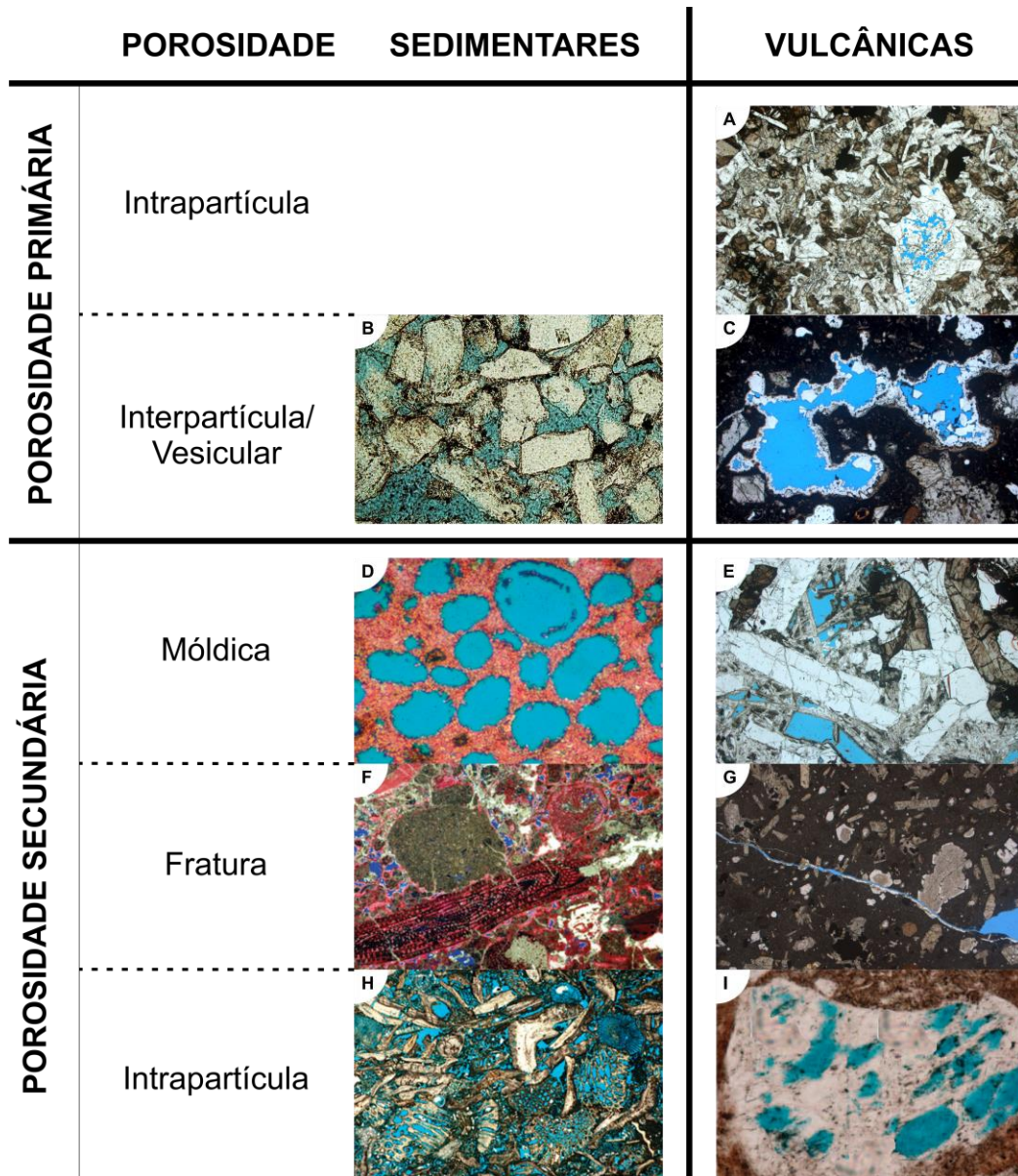


Figura 6 - Comparação microscópica de tipos de porosidade primária e secundária em rochas vulcânicas e sedimentares. As lâminas delgadas estão impregnadas com resina azul. A) Textura em peneira em plagioclásios, formando porosidade primária intrapartícula em basalto. B) Porosidade primária deposicional preservada em arenito quartzarenito. C) Porosidade primária controlada pela vesiculação em nefelinito. D) Porosidade secundária gerada pela dissolução total de oólitos em calcarenito. E) Porosidade móldica em gabro, permitindo porosidade com faces retas. F e G) Porosidade por fraturamento externo e/ou interno às partículas. H) Calcário rico em briozoários com porosidade intrapartícula. I) Cristal de feldspato alcalino com dissolução interna.

Fonte: O autor. Imagens do autor e extraídas de Sruoga; Rubinstein (2007); Scholle; Ulmer-Scholle (2003); Scholle (1979).

2.3 Descrição de Rochas Ígneas

A seguir, será apresentada a classificação modal e textural das rochas ígneas, assim como definição para rochas alcalinas subsaturadas e litofácies.

2.3.1 Classificação Modal e Textural

A classificação da classe modal de rochas ígneas para teor de máficos (M) <90 (Figura 7) depende de 4 grupos de constituintes félsicos essenciais primários (LE MAITRE *et al.*, 2005): Q, A, P e F.

- a. Os constituintes pertencentes ao grupo Q incluem minerais como quartzo, tridimita e cristobalita, e indicam composições supersaturadas em SiO₂;
- b. O grupo A é composto pelos feldspatos alcalinos, tais como ortoclásio, microclínio, pertita, sanidina e anortoclásio, além de plagioclásios (feldspatos calcossódicos) com teor de Anortita 0-5 (An₀₋₅);
- c. Os constituintes do grupo P incluem plagioclásios (feldspatos calcossódicos) com teor de Anortita 5-100 (An₅₋₁₀₀), além de minerais do grupo da escapolita, sendo presentes em diversas composições;
- d. O grupo F é composto principalmente por feldspatoides, tais como nefelina, leucita, kalsilita, sodalita, noseana, hauína, cancrinita e pseudoleucita, além de zeólitas primárias como analcima, e são indicativos de sistemas subsaturados em SiO₂. Portanto, rochas com feldspatoides primários indicam a ausência de quartzo primário;

A nomenclatura proposta para rochas vulcânicas (Figura 7) inclui 20 diferentes campos composicionais com base na mineralogia félsica. A tipificação ou qualificação das rochas engloba a classificação acerca do conteúdo de minerais máficos (Tabela 1). O grupo considerado como minerais máficos possui minerais como micas, anfibólios, piroxênios, olivinas, minerais opacos, minerais acessórios (zircão, apatita, titanita, epidoto, allanita, granada, monazita), melilita e monticelita, além de

carbonatos primários. O teor de minerais máficos escuros (M'), ou índice de cor da rocha, inclui minerais máficos essencialmente ferro-magnesianos, em que se excluem máficos como muscovitas, minerais acessórios e/ou carbonatos primários.

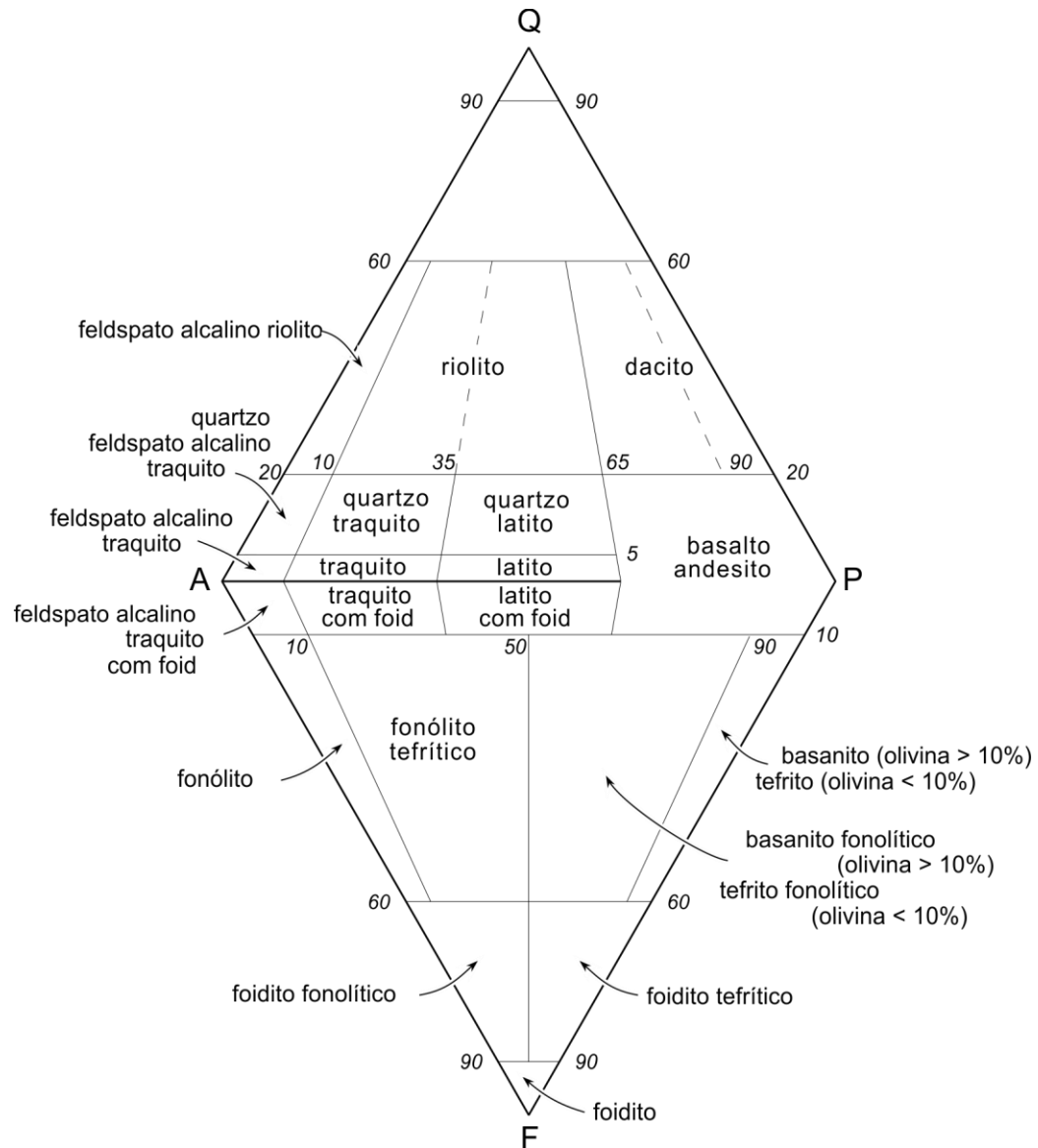


Figura 7 - Diagrama QAPF para classificação modal de rochas vulcânicas. Q=quartzo; A=feldspato alcalino; P=plagioclásio; F=feldspatoide.

Fonte: Traduzido de Le Maitre *et al.* (2005).

A classificação de lamprófiros (Quadro 1) é diferente, pois possuem ocorrência limitada e mineralogia e texturas características. Os lamprófiros geralmente ocorrem sob forma de diques, não tendo correspondentes texturais vulcânicos ou plutônicos (LE MAITRE, 2005). Estas rochas apresentam textura tipicamente porfirítica, com

conjunto dos grãos idiomórfico (ou panidiomórfico, textura lamprofírica), geralmente mesocráticos. Os fenocristais geralmente possuem mineralogia hidratada (STRECKEISEN, 1978; LE MAITRE, 2005), como anfibólios e biotitas, mas também há ocorrências de clinopiroxênios e/ou olivinas. Os feldspatos e/ou feldspatoídes, quando presentes, estão essencialmente restritos à matriz.

| M' | Classificação | Classificação | M |
|--------|-------------------|---------------|--------|
| 0-10 | Hololeucocrática | | |
| 10-35 | Leucocrática | Félsica | 0-50 |
| 35-65 | Mesocrática | | |
| 65-90 | Melanocrática | Máfica | 50-90 |
| 90-100 | Holomelanocrática | Ultramáfica | 90-100 |

Tabela 1 - Classificação das rochas ígneas quanto ao teor de minerais máficos (M) e de minerais máficos escuros (M').

Fonte: Modificado de Gill (2010).

| Constituintes de cor clara | | Minerais Máficos Predominantes | | |
|----------------------------|---------------|---|--|---|
| Feldspato | Feldspatoide | Biotita > hornblenda, ±augita/diopsídio, (±olivina) | Hornblenda, augita/diopsídio, ±olivina | Anfibólio marrom, Ti-augita, olivina, biotita |
| feld > pl | – | minette | vogesito | – |
| pl > feld | – | kersantito | espessartito | – |
| feld > pl | feld > foid | – | – | sannaíto |
| pl > feld | feld > foid | – | – | camptonito |
| – | vidro ou foid | – | – | monchiquito |

feld = feldspato alcalino; pl = plagioclásio; foid = feldspatoide.

Quadro 1 - Classificação de lamprófiros conforme conteúdo de minerais félsicos e ferro-magnesianos.

Fonte: Traduzido e adaptado de Le Maitre *et al.* (2005).

As rochas ígneas devem utilizar a nomenclatura vulcânica quando apresentam determinada granulação (*Tabela 2*), de acordo com os critérios macroscópicos e/ou microscópicos. Texturalmente, são consideradas vulcânicas aquelas em que não é possível identificar a mineralogia da matriz a olho nu, ou que possuem tamanho de cristais da matriz igual ou menor que 1 mm (GILL, 2010). Em caso de rochas extremamente finas, o nome pode somente ser dado a partir da análise de elementos maiores em geoquímica de rocha total.

| Visualização Macroscópica | Classificação de Granulação | Visualização Microscópica |
|---|------------------------------------|----------------------------------|
| Cristais da matriz podem ser identificados a olho nu | Granulação Grossa | >3mm |
| Cristais da matriz são pequenos demais para identificação a olho nu | Granulação Média | >1mm <3mm |
| Cristais da matriz são pequenos demais para visualização a olho nu | Granulação Fina | <1mm |

Tabela 2 - Classificação das rochas ígneas quanto à granulação com base em aspectos macroscópicos e microscópicos.

Fonte: Modificado de Gill (2010).

2.3.2 Rochas Alcalinas Subsaturadas

Rochas ígneas alcalinas, volumetricamente, representam menos de 1% de todas as rochas ígneas (FITTON; UPTON, 1987) e apresentam grande complexidade e diversidade de composições. Com exceção dos carbonatitos, podem ser definidas como rochas que contêm (1) feldspatoides e/ou anfibólios ou piroxênios alcalinos modais ou (2) feldspatoides ou acmita normativos (LE MAITRE, 2005).

Segundo Gibson *et al.* (1995), magmas alcalinos são naturalmente ricos em voláteis, principalmente composições máficas potássicas, e representam as primeiras fusões de um manto litosférico aquecido ou estendido. A petrologia de rochas alcalinas tem sido relevante para a prospecção de mineralizações (P, Nb, Ta, LILE, ETR), reconstruções geológicas regionais (ULBRICH & GOMES, 1981; FITTON;

UPTON, 1987; CHAKHMOURADIAN; ZAITSEV, 2012) e para o estudo da composição do manto em grandes profundidades.

2.3.3 Intrusões Cilíndricas

Necks e *plugs* são intrusões verticais cilíndricas, semelhante à forma de cones ou funis, que formam condutos ligando vulcões ou intrusões subvulcânicas a reservatórios magmáticos mais profundos (SIGURDSSON, 2015). Essas formas representam a fração remanescente interna de sistemas vulcânicos extintos e são comuns apenas perto da superfície, onde a rocha encaixante frágil pode ser cortada e preenchida em superfície pelo magma ascendente.

Segundo Sigurdsson (2015), um *neck* é um alimentador magmático, semelhante a um talo, diretamente conectado a um vulcão e compoendo sua estrutura interna. Após a erosão da fração fragmentada e/ou hidrotermalizada do edifício vulcânico e das rochas adjacentes, o *neck* vulcânico fica preservado no relevo. Um *plug* é uma fração solidificada de magma que preenche uma abertura vulcânica, condutos secundários ou fraturas de formato cilíndrico. Esses sistemas são subvulcânicos e podem ser remanescentes de sistemas de alimentação, embora não estejam diretamente ligados a um conduto vulcânico principal. Essas feições geralmente apresentam disjunções colunares verticais (Figura 9) e podem ser difíceis de distinguir em campo, principalmente com uma exposição limitada de rochas.

2.3.4 Litofácies

O conceito de litofácies abrange a classificação de fácies acerca da litologia e principais texturas, estruturas e processos distinguíveis de outros (CAS; WRIGHT, 1988) sendo, portanto, apropriada a utilização do termo. A terminologia de litofácies fornece informações sobre as características das fácies evidentes em escala de afloramento (MCPHIE, 1993), como estruturas, organização interna e geometria, mas também em microescala.

O tipo de colocação de lavas e magmas pode gerar diferentes fácies em determinado tipo de depósito. Os depósitos vulcânicos podem ser separados em 3 diferentes tipos (MCPHIE, 1993):

- a. Erupções explosivas: produzem ampla variedade de depósitos piroclásticos fragmentados;
- b. Erupções efusivas: derrames de lava e domos que compreendem fácies coerentes e autoclásticas, isto é, fragmentação do próprio sistema. As rochas autoclásticas ocorrem durante o movimento dos fluxos de lava ou expansão de gases ao longo do fluxo (FISHER, 1961);
- c. *Emplacement* sin-vulcânico: colocação de criptodomos, diques e/ou soleiras que compreendem fácies coerentes e autoclásticas;

As rochas desses depósitos podem ser classificadas descritivamente, segundo McPhie (1993), em (1) vulcânicas coerentes e (2) vulcanoclásticas, principalmente. A classificação das fácies vulcanoclásticas não é genética e independe do tamanho, forma ou origem dos fragmentos (FISHER, 1961). Já fácies coerentes são descritas como solidificadas e cristalizadas diretamente a partir de um magma ou lava.

A classificação de fácies para lavas coerentes e intrusões, com base no código de fácies de Miall (1977), baseia-se em 4 itens: (1) composição, (2) termo de litofácies ou estrutura, (3) textura e (4) alteração. McPhie (1993) recomenda o uso mínimo dos itens 1 e 2 para definição de fácies. Para geração de um código simplificado de fácies, a classificação indica a colocação do item composicional com uma letra maiúscula, seguido dos demais itens com letra minúscula (e.g. Lm: Lamprófiro Maciço).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho, alguns métodos são fundamentais para a concretização dos objetivos. As metodologias e estratégias de ação executadas são separadas em 3 fases: etapa pré-campo, etapa de campo e etapa pós campo, com realização de análises em laboratório.

3.1 Etapa Pré-campo

A etapa primária compreendeu o levantamento bibliográfico e revisão por meio de acesso às publicações que descreveram os principais aspectos morfológicos e características dos corpos subvulcânicos do Complexo Trindade. A etapa também compreendeu a compilação de materiais sobre influência de sistemas ígneos em bacias petrolíferas, aspecto necessário para embasamento teórico do trabalho.

3.2 Etapa de Campo

A etapa de campo compreendeu o mapeamento geológico na Ilha da Trindade, realizado pela Me. Natália Gauer Pasqualon e pelo Me. Fernando Rodrigues da Luz, entre março e maio de 2019. O autor deste trabalho não participou da etapa de campo, mas teve pleno acesso aos dados e materiais coletados e discutidos pelo grupo de pesquisa.

O mapeamento compreendeu descrição petrográfica macroscópica com base em fenocristais e estimativa da macroporosidade de todas as unidades geológicas da ilha, com foco no Complexo Trindade. A amostragem foi realizada com martelo e/ou marreta e o registro fotográfico de detalhe teve foco nas morfologias de corpos vulcânicos/subvulcânicos. Os pontos visitados foram georreferenciados por meio de GPS Garmin eTrex 10. As amostras coletadas foram devidamente identificadas e transportadas.

3.3 Etapa Pós-campo

A etapa pós-campo compreendeu as fases de compilação dos dados de campo e seleção das amostras para corte e laminação, além da preparação dos exemplares

selecionados para as análises de laboratório necessárias para a realização deste trabalho. Essa etapa incluiu confecção de lâminas delgadas e análises em Microtomógrafo Computadorizado de Raios X.

3.3.1 Compilação dos Dados de Campo

As descrições das rochas da Ilha da Trindade feitas pelo grupo de pesquisa durante atividade de campo foram digitalizadas de forma a criar-se um banco de dados virtual. Nele, estão contidos todos os tipos de dados adquiridos em atividade de campo e todos os dados de análises de laboratório.

3.3.2 Seleção das Amostras

A seleção das amostras foi realizada a fim de abranger as diversas composições coerentes do Complexo Trindade que apresentem diferentes estruturas, texturas, morfologias e/ou modos de colocação. As amostras também foram escolhidas com base na representatividade em relação aos corpos subvulcânicos a serem estudados. Foram selecionadas 14 amostras para confecção de lâminas delgadas e descrição microscópica e 6 destas para análise em microtomografia computadorizada de raios X (MCT).

3.3.3 Corte das Amostras e Laminação

A confecção de lâminas delgadas nas amostras selecionadas foi realizada na empresa *Petrografia BR*. As amostras foram cortadas e fatiadas com serra diamantada em meio aquoso para manutenção de temperatura, diminuição do atrito e melhor precisão do corte. Após a retirada de uma fatia de pelo menos 3 centímetros das amostras, uma das faces foi recortada, lixada e polida em politriz com abrasivos de dureza elevada (Al_2O_3) e impregnadas com resina azul *epóxi*, a fim de destacar os espaços da rocha não preenchidos. Após secagem das amostras, as rochas foram coladas em vidros apropriados para observações microscópicas e as lâminas foram rebaixasadas em até 30 μm de espessura.

Para análise em MCT, foi necessário realizar o corte das amostras na forma de cilindros. Os cilindros foram cortados com broca diamantada de base fixa em

marmoraria do estado de Santa Catarina. Os testemunhos possuem diâmetro de 2 centímetros, com altura média de 4 centímetros.

3.3.4 Petrografia

Primeiramente, as amostras foram descritas macroscopicamente em campo, a fim de estabelecer os critérios iniciais para a classificação da classe modal das rochas subvulcânicas e estimativas visuais texturais. Posteriormente, com a confecção das lâminas delgadas impregnadas, foi possível detalhar as feições texturais, mineralógicas e o sistema permo-poroso 2D, desenvolvendo um código de fácies para cada litotipo com base em composição e estrutura principal da rocha.

As lâminas delgadas confeccionadas foram descritas no Laboratório de Rochas Vulcânicas, nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com todos os protocolos de segurança e de saúde cumpridos. O equipamento utilizado é um microscópio petrográfico de luz transmitida *Leitz Labourlux 12*, com uma câmera digital acoplada *Scion Corporation* modelo *CFW-1612C*. A classificação da rocha e a porcentagem de cada fração mineral, assim como da porosidade, foi estimada com base na observação. A descrição foi realizada em luz transmitida polarizada paralela (||) e perpendicular (+), além do uso de luz convergente, quando necessário. A aquisição de microfotografias foi obtida por auxílio do *software ZEN Blue Edition*, versão 3.5, adicionando escala centimétrica/milimétrica às imagens.

3.3.5 Microtomografia de Raios-X

A microtomografia computadorizada de raios X (MCT) é uma técnica não-destrutiva baseada nas diferenças de densidade dos materiais, gerando imageamento de alta resolução e elevado contraste que permite visualizar a estrutura interna do objeto. O estudo da técnica expande as aplicações do equipamento e fornece dados complexos e completos sobre sistemas permo-porosos 3D. O Micro-CT (Figura 8) possui uma fonte emissora de ondas de raios X que percorre internamente a amostra até leitura dos dados em um detector. Essa amostra é presa com cera em um suporte e gira conforme leitura dos raios X. De acordo com Vieira *et al.* (2021), a gravação dos dados se dá por compilação de fatias 2D, em que a qualidade depende do

espaçamento entre as fatias (*slices*) analisadas, que podem chegar a 2 μm . Posteriormente, os dados foram tratados por *software* para reconstrução do imageamento.

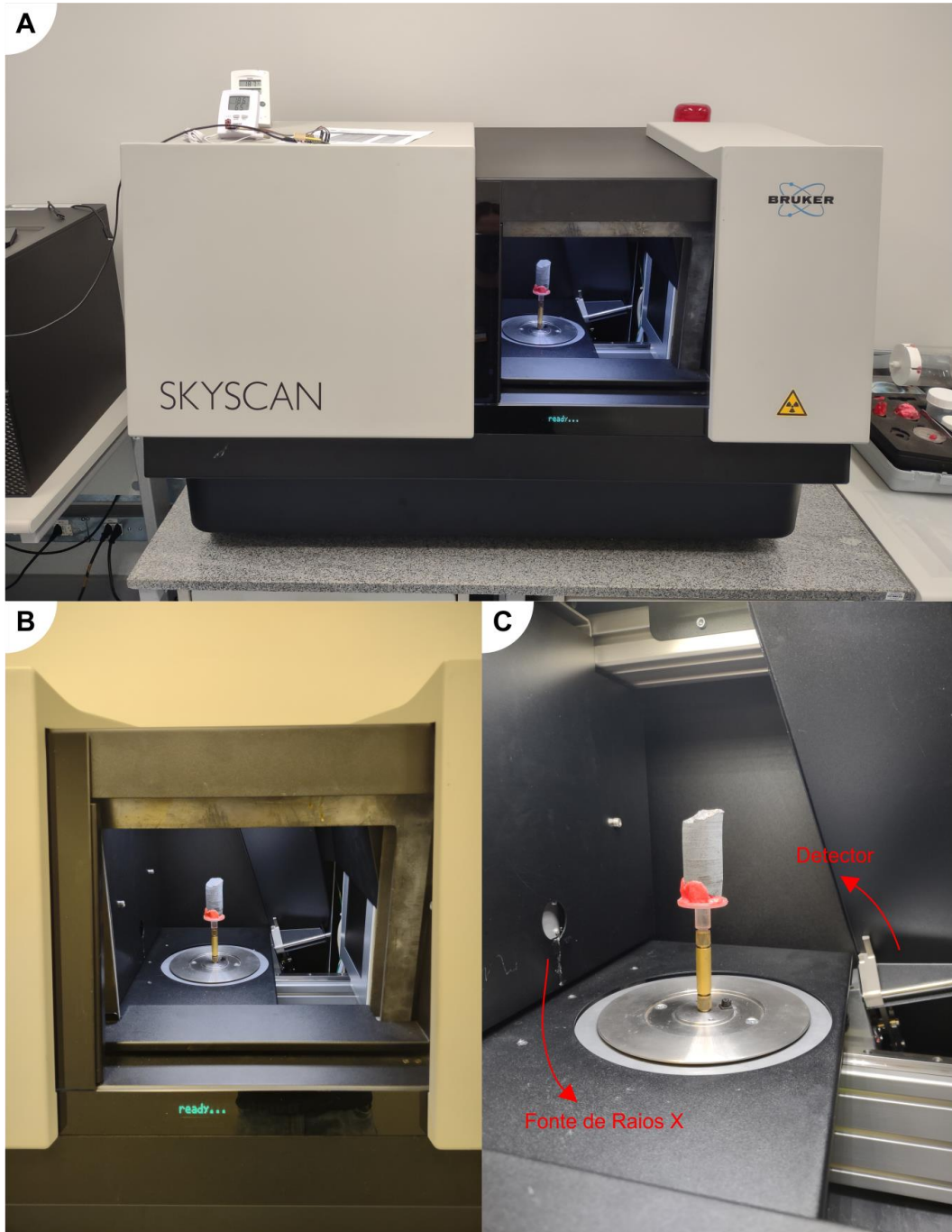


Figura 8 - Microtomógrafo de raios X (A). O equipamento emite raios X pela amostra que está presa a um suporte com cera (B). O detector (C) processa os dados e compila as imagens.

Fonte: O autor.

O microtomógrafo gera contraste por densidade e proporciona (1) identificação de poros com diferentes geometrias, (2) observação 3D da porosidade e as prováveis causas de sua geração, (3) classificação qualitativa da porosidade e (4) percepções acerca da conexão entre os poros. A microtomografia computadorizada de raios X foi realizada no Instituto de Petróleo e Recursos Naturais (IPR) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), entre o fim de maio e início de junho de 2022. Para este trabalho, as amostras selecionadas foram analisadas no equipamento Bruker SkyScan1173, gerando 3.108 fatias por amostra. As condições de análise são de 130 kV e 61 μ A, com espaçamento entre *slíces* de 13,825 μ m. Esta resolução é suficiente para visualizar quaisquer poros de tamanho maior do que os descritos em lâmina. A amostra foi rotacionada 0,2° por fatia, obtendo um giro total de 240°, com exposição média por amostra de 1 hora e reconstrução de imagens e processamento com duração média de 30 minutos por meio do *software NRecon*, versão 1.7.4.6. As imagens finais têm resolução largura X altura de 1964 X 1932 pixels, respectivamente.

3.3.6 Tratamento dos Dados

A pandemia do coronavírus, com início no Brasil no primeiro semestre de 2020, inviabilizou algumas das fases de aquisição de dados anteriormente previstas e a disponibilidade para uso de certos equipamentos. As etapas de (1) campo no local de estudo e (2) confecção de lâminas delgadas impregnadas foram realizadas anteriormente à pandemia. O alto custo das análises de microtomografia de raios X reduziu o número de amostras estudadas. Contudo, a quantidade disponível foi suficiente para a realização deste trabalho.

O tratamento dos dados envolveu a utilização de alguns programas para melhor visualização dos dados. As fotografias deste trabalho foram montadas e editadas no *software CoreIDRAW 2018*, versão 20.0. As tabelas foram produzidas no *software Microsoft Excel 2016*, versão 16.0.1. As análises qualitativas de MCT foram visualizadas e interpretadas no *software DataView*. A análise quantitativa da porosidade, inicialmente prevista, não foi realizada devido ao acesso limitado aos laboratórios e à não disponibilização de *softwares* específicos que exigem grande capacidade de *hardware* e de financiamento. A integração dos dados e interpretação dos resultados permitiu a construção de um modelo das características porosas para as rochas subvulcânicas do Complexo Trindade.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados quanto às descrições de campo em escala de afloramento, a classificação modal das rochas e descrição em microscopia de luz transmitida, as litofácies definidas e as análises em MCT. A classificação modal e de litofácies serão abordadas separadamente, a fim de dar a ênfase necessária aos dois temas. O autor deste trabalho não participou das etapas de campo e os dados foram obtidos pelo grupo de pesquisa do autor.

4.1 Descrição de Campo

O mapeamento geológico na Ilha da Trindade permitiu a descrição de rochas vulcanoclásticas, subvulcânicas e de derrames de lava. As rochas descritas para o Complexo Trindade, base da ilha, incluem composições alcalinas subsaturadas em sílica (SiO_2), em que foram descritos 14 corpos subvulcânicos de composição fonolítica, lamprófirica e nefelinítica (*Tabela 3*). As rochas foram classificadas petrograficamente pela nomenclatura vulcânica por apresentarem matriz de granulação predominantemente fina (não visualizável a olho nu).

Os fonólitos são as rochas mais abundantes nesta unidade e podem ser vistos a quilômetros de distância, representando o maior volume de rochas expostas na ilha. O modo de colocação característico dessas rochas ocorre principalmente sob forma de *necks* e *plugs* (Figura 9) com disjunções colunares, que podem ultrapassar os 400 metros de altura, mas também sob forma de diques subverticais de orientação predominantemente NE-SW. As rochas apresentam tom cinza claro, e variam de afíricas a porfiríticas. Algumas intrusões apresentam abundância em enclaves máficos/ultramáficos de até 2 centímetros e texturas de fluxo ígneo marcada pelos fenocristais.

Os lamprófiros ocorrem exclusivamente sob a forma de diques subverticais pouco espessos, de 10-50 centímetros, com direção predominantemente NW-SE. Essas rochas apresentam coloração predominantemente preta, com alteração para coloração laranja, provavelmente devido aos óxidos e hidróxidos de ferro presentes. Os lamprófiros são porfiríticos, possuem elevada vesiculação esférica de até 2 centímetros e, assim como os fonólitos, apresentam enclaves máficos/ultramáficos angulosos de até 5 centímetros.

Os nefelinitos também intrudem apenas sob forma de diques subverticais de até 1 metro de espessura e apresentam direção variante de NE-SW a E-W. Essas rochas são cinza escuras e porfíricas a afíricas, predominantemente homogêneas, com disjunções colunares e enclaves/xenocristais de olivinas.

| Amostras | Coordenadas (UTM) - Fuso 26K | | Litologia | Emplacement | Cota (m) |
|-----------------|-------------------------------------|------------|------------------|--------------------|-----------------|
| APA - 01* | 257781 mE | 7730734 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 188 |
| APA - 02 | 259418 mE | 7729669 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 111 |
| APA - 04 | 256661 mE | 7732510 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 0 |
| APA - 06 | 256467 mE | 7732642 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 1 |
| APA - 10 | 257114 mE | 7731433 mN | Lamprófiro | Dique | 132 |
| APA - 16 | 259101 mE | 7729612 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 150 |
| APA - 17 | 256810 mE | 7731973 mN | Fonólito | <i>Neck/plug</i> | 40 |
| DIQ - 01* | 257781 mE | 7730734 mN | Nefelinito | Dique | 188 |
| DIQ - 02 | 257259 mE | 7731548 mN | Nefelinito | Dique | 39 |
| DIQ - 03 | 257140 mE | 7731452 mN | Sodalitito | Dique | S/D |
| DIQ - 04 | 256504 mE | 7731294 mN | Nefelinito | Dique | 308 |
| DIQ - 05** | 256777 mE | 7731260 mN | Fonólito | Dique | S/D |
| DIQ - 06** | 256777 mE | 7731260 mN | Nefelinito | Dique | 223 |
| DIQ - 07 | 256804 mE | 7731977 mN | Lamprófiro | Dique | 34 |

* As amostras foram coletadas no mesmo local.

S/D= sem dados.

** As amostras foram coletadas no mesmo local.

Tabela 3 - Dados de campo das 14 amostras subvulcânicas estudadas no Complexo Trindade.

Fonte: Grupo de pesquisa do autor.

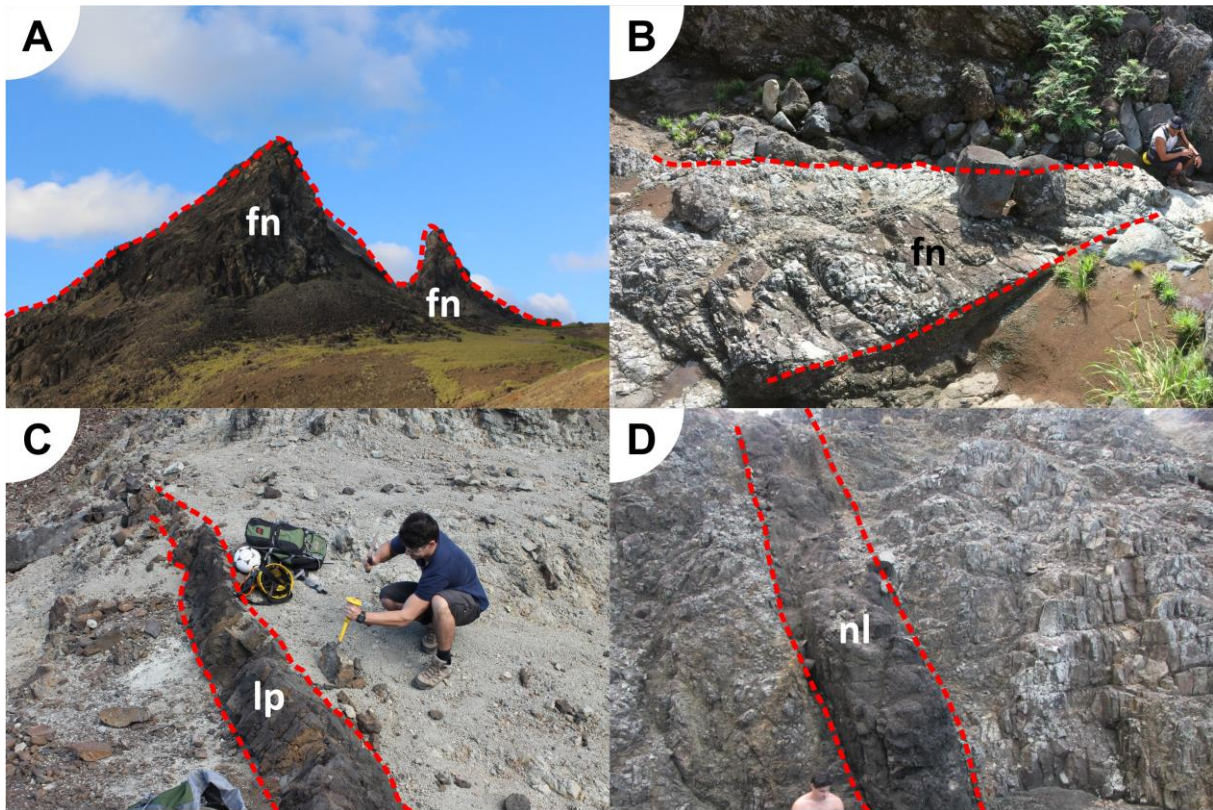


Figura 9 - Rochas subvulcânicas do Complexo Trindade. Os fonólitos podem se apresentar na forma de *necks* e *plugs* (A) ou diques (B). Os lamprófiros (C) e os nefelinitos (D) intrudem exclusivamente sob forma de diques. fn = fonólitos; lp = lamprófiros; nl = nefelinitos.

Fonte: Grupo de pesquisa do autor.

4.2 Descrição Microscópica

A descrição microscópica das rochas permitiu diferenciar 3 diferentes classes modais para rochas subvulcânicas coerentes do Complexo Trindade, obedecendo aos critérios de (1) mineralogia, (2) índice de cor (M'), (3) granulação e/ou (4) relações entre os cristais. A petrografia microscópica permitiu maior detalhamento e confirmou a maior parte das descrições de campo: fonólitos, feldspatoiditos (nefelinitos e sodalititos) e lamprófiros. A descrição em relação à (1) porosidade e (2) cristalinidade é abordada na seção subsequente.

4.2.1 Fonólitos

Foram descritas 7 amostras de fonólitos. Os fonólitos (Figura 10) possuem granulação fina (<0,5 mm) e são hololeucocráticos a leucocráticos ($M'=5-20$). Essas rochas possuem fenocristais (10-15%) a microfenocristais (5-10%) e minerais félsicos de sanidina, nefelina e minerais do grupo da sodalita. Os minerais máficos são representados principalmente por clinopiroxênios (diopsídio/hedembergita), anfibólios (hornblenda marrom) e acessórios como titanita, apatita, espinélios e, muito raramente, biotita.

As sanidinas, principais constituintes dessas rochas, possuem hábito prismático de até 4 mm de comprimento em lâmina delgada, mas podem chegar a até 5 cm em macroanálise. Esses cristais são euédricos a subédricos, e geralmente estão fortemente zonados (Figura 10 B) ou apresentam maclas simples (Figura 10 E), não sendo comum encontrar essas feições juntas no mesmo cristal. Alguns fenocristais de certas amostras apresentam textura em peneira (Figura 10 A), principalmente nas bordas, que também podem estar arredondadas. Na matriz, as sanidinas são euédricas e geralmente estão alinhadas, formando textura traquítica (Figura 10 E).

As nefelinas apresentam-se bastante homogêneas em fenocristais de hábito prismático/hexagonal de até 3 mm de comprimento. Os fenocristais são geralmente euédricos (Figura 10 B e F) e agrupam-se em vários cristais (textura glomeroporfirítica). Na matriz ou em microfenocristais, esse mineral pode apresentar bordas arredondadas. Além disso, as nefelinas, por vezes, possuem alteração para cancrinita e carbonatos (Figura 10 B). A separação entre nefelina (uniaxial) e sanidina (biaxial, $2V=0^\circ$) nos fenocristais pode ser difícil, visto que podem apresentar as mesmas propriedades óticas.

Os minerais do grupo da sodalita compõem principalmente microfenocristais euédricos equidimensionais de até 1 mm. Esses cristais estão geralmente alterados e substituídos por argilominerais (?) e/ou zeólitas, facilitando sua identificação. Há uma tendência de sodalitas serem englobadas pelo crescimento das sanidinas, formando um padrão poiquilítico (Figura 10 A) para esses minerais. Não é possível diferenciar com acurácia possíveis variações composicionais dos minerais do grupo da sodalita. Contudo, certos núcleos possuem coloração mais escuras em relação à borda, podendo sugerir uma variação composicional entre hauína, noseana e sodalita.

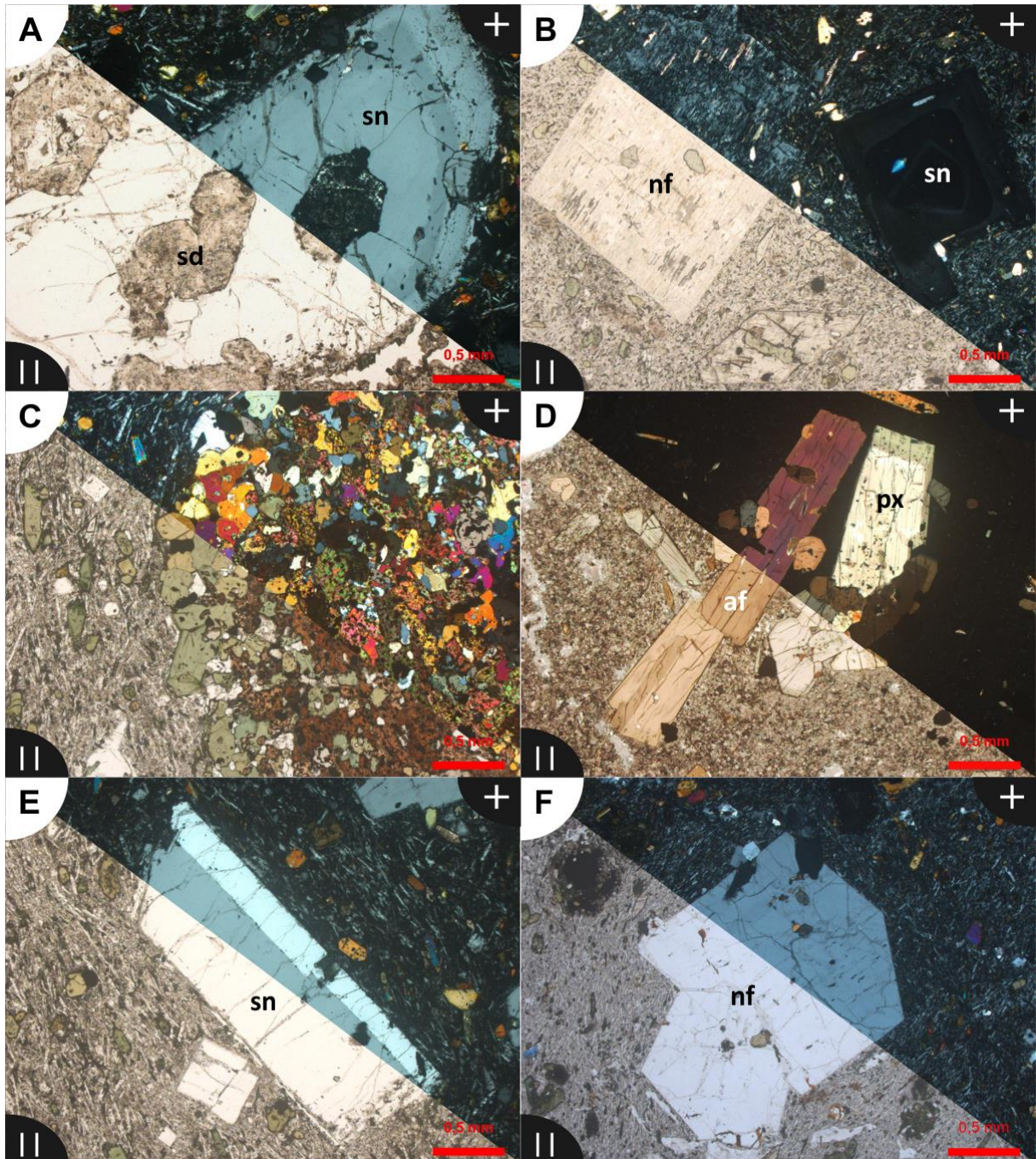


Figura 10 – Fotomicrografias de fonólitos do Complexo Trindade. Os fonólitos possuem fenocristais de sanidinas (A, B e E), nefelinas (B e F), sodalita poiquilítica (A), piroxênios (D) e anfibólios (D). Enclaves máficos (C) ocorrem em todas as rochas em meio à matriz traquítica (C e E). ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; px=piroxênio; af=anfibólio; nf=nefelina; sn=sanidina; sd=sodalita. Amostras: A) APA-02; B) APA-04; C e E) APA-06; D) DIQ-05; F) APA-16;

Fonte: O autor.

Os minerais máficos são representados principalmente por fenocristais de clinopiroxênios de até 1,5 mm de comprimento dispostos em hábito prismático longo. Os fenocristais são geralmente euédricos, assim como na matriz, e podem compor, juntamente com as sanidinas da matriz, a textura traquítica. Os piroxênios também apresentam forte zonação, com bordas e núcleos com coloração diferente, variando de verde forte a incolor. Observa-se também agregados glomeroporfíricos, zonas internas arredondadas e textura em peneira em alguns cristais (Figura 10 D). As hornblendas marrons, presentes em algumas amostras, possuem hábito prismático, zonação incipiente (Figura 10 D) e, por vezes, bordas arredondadas com textura coronítica para opacos. Algumas amostras apresentam matriz de prováveis egirinaugitas. Todas as amostras possuem enclaves máficos/ultramáficos de piroxenitos alcalinos e/ou nefelina sienitos.

4.2.2 Feldspatoiditos

Foram descritas 5 amostras de feldspatoiditos, sendo 4 de nefelinitos (Figura 11 A, B, C, E e F) e 1 de sodalitito (Figura 11 D). As duas litologias são composicional e texturalmente muito semelhantes, variando apenas quanto ao feldspatoide mais abundante. Os feldspatoiditos ou foiditos possuem granulação fina (<0,2 mm) e são mesocráticos ($M'=40-50$). Essas rochas possuem fenocristais (5-10%) a microfenocristais (20-25%) e minerais félsicos de nefelina e/ou minerais do grupo da sodalita. Os minerais máficos são representados principalmente por clinopiroxênios (diopsídio/hedembergita) e acessórios como hornblendas marrom, olivinas e espinélios.

Nos nefelinitos, os fenocristais de nefelina possuem bordas arredondadas de até 2,5 mm e apresentam-se com alteração para cancrinita e/ou carbonatos, facilitando sua identificação. Na matriz, não é possível identificar grande quantidade de feldspatoides, embora se visualize massas de cristalitos/micrólitos isótopos e/ou de baixa birrefringência. Nos sodalititos, os minerais do grupo da sodalita (Figura 11 D) ocorrem em microfenocristais euédricos de hábito equidimensional de até 1 mm. As sodalitas apresentam coloração entre marrom a incolor do centro à borda do grão, indicando provável zonação composicional. Esses cristais não estão alterados e comumente estão dispostos em arranjo glomeroporfírico.

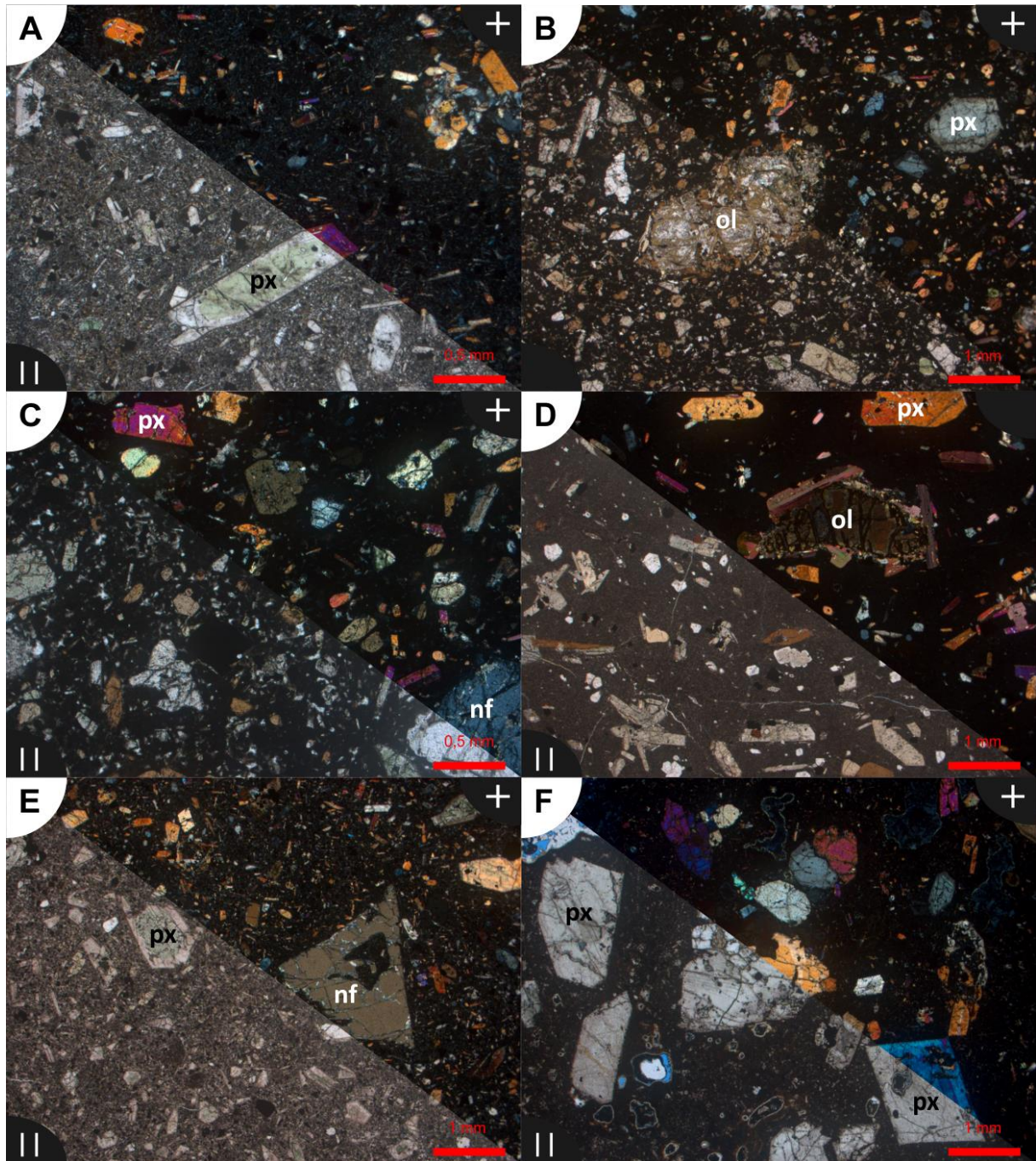


Figura 11 - Fotomicrografias de feldspatoiditos do Complexo Trindade. Os nefelinitos (A, B, C, E e F) possuem fenocristais principalmente de nefelina (C e E) e piroxênios (A, B, C, D, E e F). O sodalitito (D) possui piroxênios e sodalitas como fenocristais principais. Os feldspatoiditos possuem cristais de olivinas (B e D) completamente alterados. ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; px=piroxênio; nf=nefelina; ol=olivina. Amostras: A) DIQ-01; B e C) DIQ-02; D) DIQ-03; E) DIQ-06; F) DIQ-04;

Fonte: O autor.

Os clinopiroxênios são os principais constituintes dessas rochas e possuem hábito prismático longo de até 2 mm de comprimento. O conjunto dos minerais é hipidiomórfico a idiomórfico, tanto na matriz quanto nos fenocristais. Esses cristais apresentam comumente zonação (Figura 11 A), com variações de cores entre verde e incolor do núcleo para a borda, não necessariamente nessa ordem. Alguns desses cristais possuem textura em peneira em suas bordas e/ou centros do grão.

O restante dos minerais máficos é composto por olivinas e hornblendas marrom. As olivinas ocorrem na rocha em cristais de até 2,5 mm (Figura 11 B e D) e em raros microfenocristais euédricos de hábito prismático curto, não alterados. Os cristais de maior tamanho apresentam-se com fraturas internas irregulares e estão parcialmente ou totalmente alterados para carbonatos, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou iddingsita. A instabilidade provavelmente indica que os cristais maiores e alterados de olivina são xenocristais. As hornblendas, em quantidade acessória, ocorrem em fenocristais e microfenocristais de hábito prismático longo, subédricos a euédricos, de comprimento até 1 mm. Por vezes, esses cristais apresentam bordam arredondadas com textura coronítica para opacos.

4.2.3 Lamprófiros

Foram descritas 2 amostras de lamprófiros. Os lamprófiros (Figura 12) possuem granulação fina (<0,3 mm) e são mesocráticos ($M'=35-40$). Essas rochas possuem fenocristais (5%) a microfenocristais (20-25%) de hornblenda marrom, clinopiroxênios (diopsídio/augita) e acessórios como apatita, biotita e prováveis espinélios/ilmenitas.

Os clinopiroxênios são os minerais mais abundantes nessas rochas e possuem hábito prismático curto e dimensões de até 5 mm de comprimento. Os fenocristais e microfenocristais são predominantemente euédricos e apresentam comumente textura em peneira (Figura 12 A e B) na região interna do grão. Esses cristais também apresentam áreas internas dissolvidas e recristalizadas, além de forte zonação (Figura 12 A) marcada por variação de coloração verde a incolor.

Os anfibólios ocorrem em fenocristais de hábito prismático longo e dimensões de até 3 mm de comprimento. Esses cristais são euédricos, possuem zonação composicional incipiente e textura coronítica para opacos.

Há ocorrência frequente de minerais acessórios como apatitas, biotitas e espinélios. As apatitas (Figura 12 B e D) possuem dimensões de até 1 mm de comprimento nas seções de hábito prismático longo. Quando em seções basais, apresentam-se como hexágonos de baixa birrefringência (Figura 12 D) que, por vezes, estão englobadas por fenocristais de clinopiroxênios (textura poiquilítica). Esses cristais variam de euédricos a subédricos e, por vezes, apresentam bordas arredondadas e fraturamento. As biotitas (Figura 12 C) ocorrem em pequena quantidade como microfenocristais lamelares de até 3 mm de comprimento. Na matriz, também é possível observar o crescimento de pequenos núcleos isolados desses minerais. Os espinélios (Figura 12 A, B e C) ocorrem como microfenocristais opacos equidimensionais de até 1 mm, não sendo possível classificá-los com acurácia.

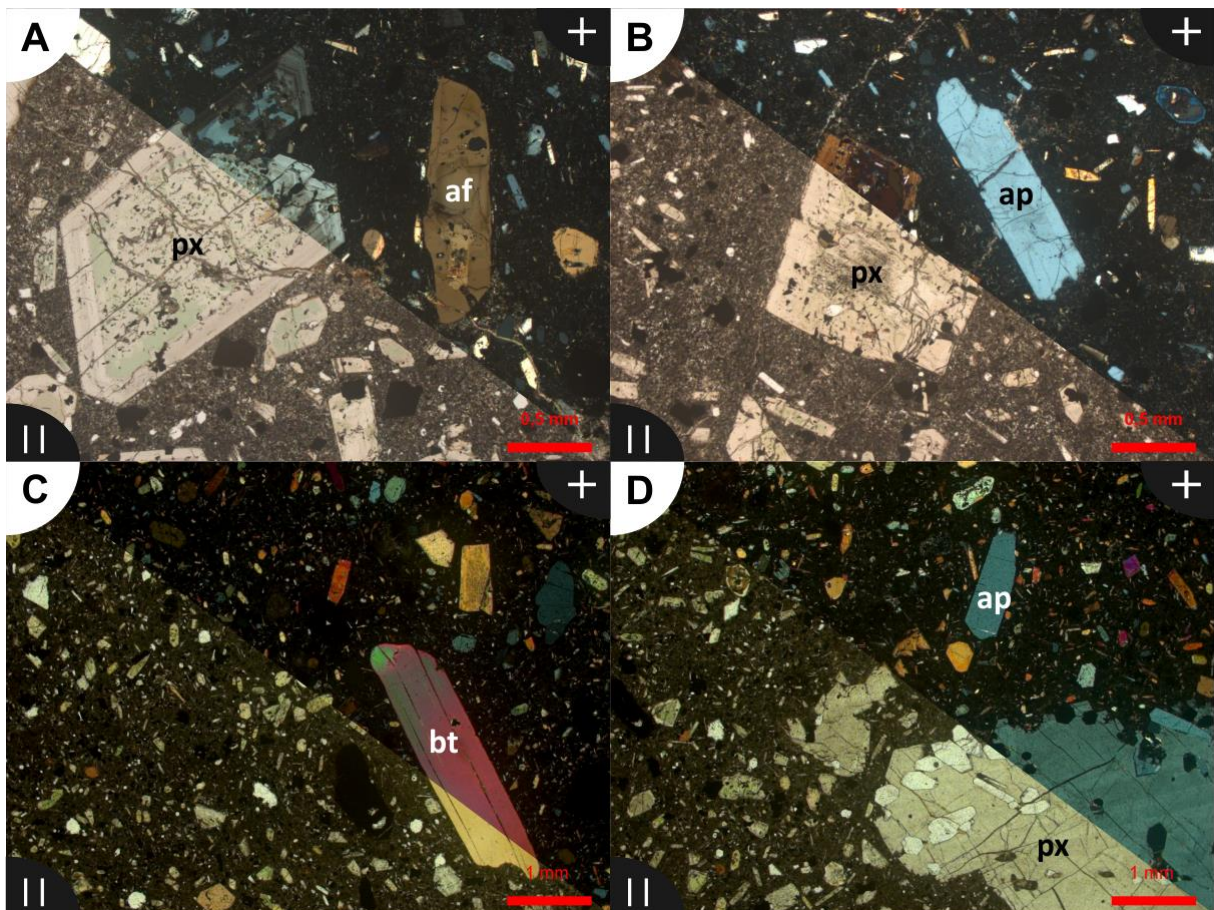


Figura 12 - Fotomicrografias de lamprófiros do Complexo Trindade. Os lamprófiros são hipocristalinos e possuem fenocristais de piroxênio (A, B e D), apatita (B e D) anfibólio (A) e biotita (C). ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; ap=apatita; px=piroxênio; bt=biotita; af=anfíbólio. Amostras: A e B) APA-10; C e D) DIQ-07;

A matriz é composta por opacos, prováveis feldspatoides e micrólitos de piroxênios, predominantemente. Enclaves foram observados em todas as amostras e possuem dimensões de 2 mm a 10 cm, contatos retos com os lamprófiros e composições que variam de hornblenditos a piroxenitos alcalinos. Segundo o Quadro 1, por apresentar (1) granulação fina, em que os cristais da matriz não são identificáveis nem mesmo ao microscópio, (2) massa cristalina provavelmente composta por feldspatoides e (3) apresentar anfibólios, clinopiroxênios e biotitas, essas rochas podem ser classificadas como monchiquitos.

4.3 Litofácies

As litofácies foram definidas com base nas (1) composições das rochas descritas e (2) estrutura principal, avaliando os aspectos texturais quanto à cristalinidade e ao tipo e quantidade de porosidade para cada grupo. As duas diferentes fases de resfriamento estão presentes em todas as rochas e não são incluídas na interpretação, pois não são um diferencial. A interpretação remete aos processos de *emplacement* das rochas subvulcânicas. Foram definidas 6 litofácies para as rochas do Complexo Trindade (Quadro 2): fonólitos maciços (Pm), fonólitos vesiculados (Pv), lamprófiros amigdaloides (La), lamprófiros maciços (Lm), feldspatoiditos fraturados (Ff) e nefelinitos vesiculados (Fv).

| Código | Litofácies | Descrição | Interpretação |
|--------|--------------------------|---|--|
| Pm | Fonólitos Maciços | Fonólito maciço porfirítico, hipocristalino a holocristalino, com fluxo ígneo. Ocorrem em <i>necks</i> e <i>plugs</i> | Intrusão coerente rasa de viscosidade moderada e com taxa média/alta de resfriamento final. |
| Pv | Fonólitos Vesiculados | Fonólito com vesículas estiradas alinhadas de contato irregular. Ocorre em diques. | Intrusão coerente rasa de viscosidade alta, supersaturada em voláteis, e com alta taxa de resfriamento final. |
| La | Lamprófiros Amigdaloides | Lamprófiro com amígdalas esféricas a estiradas alinhadas de contato reto. Ocorre em diques. | Intrusão coerente rasa de viscosidade média/baixa, supersaturada em voláteis, com alta taxa de resfriamento final e percolação de fluidos secundários. |

| Código | Litofácies | Descrição | Interpretação |
|--------|-------------------------------|---|--|
| Lm | Lamprófiros Maciços | Lamprófiro maciço porfirítico e hipocristalino. Ocorre em diques. | Intrusão coerente rasa de viscosidade baixa e com taxa alta de resfriamento final. |
| Ff | Feldspatoiditos Fraturados | Nefelinitos a sodalitos fraturados, porfiríticos e hipocristalinos. Ocorre em diques. | Intrusão coerente rasa e fraturada de viscosidade baixa e com alta taxa de resfriamento final. |
| Fv | Nefelinitos Vesiculados | Nefelinito vesiculado porfirítico e hipocristalino. Ocorre em diques. | Intrusão coerente rasa de viscosidade média/baixa, supersaturada em voláteis, com alta taxa de resfriamento final. |

Quadro 2 - Litofácies descritas para o Complexo Trindade.

Fonte: O autor.

4.3.1 Fonólitos Maciços (Pm)

A litofácies abrange 6 amostras e apresenta textura porfirítica e estrutura maciça, sem porosidade primária aparente, e varia de holocristalina a hipocristalina. As rochas holocristalinas (Figura 13 A e B) apresentam fluxo ígneo na matriz marcado pelo alinhamento de cristais. Já as rochas hipocristalinas (Figura 13 C e D) apresentam fluxo ígneo incipiente marcado por alguns fenocristais e alinhamento de minerais/zonas intersticiais tardias. Todas as ocorrências desta litofácies intrudem sob forma de *necks* e/ou *plugs*. Também ocorre, em alguns grãos isolados de feldspatoides, porosidade intrapartícula e móldica de até 0,2 mm. Portanto, interpreta-se essa litofácies como intrusão rasa coerente de viscosidade moderada, sem supersaturação em voláteis, e com taxa média/alta de resfriamento.

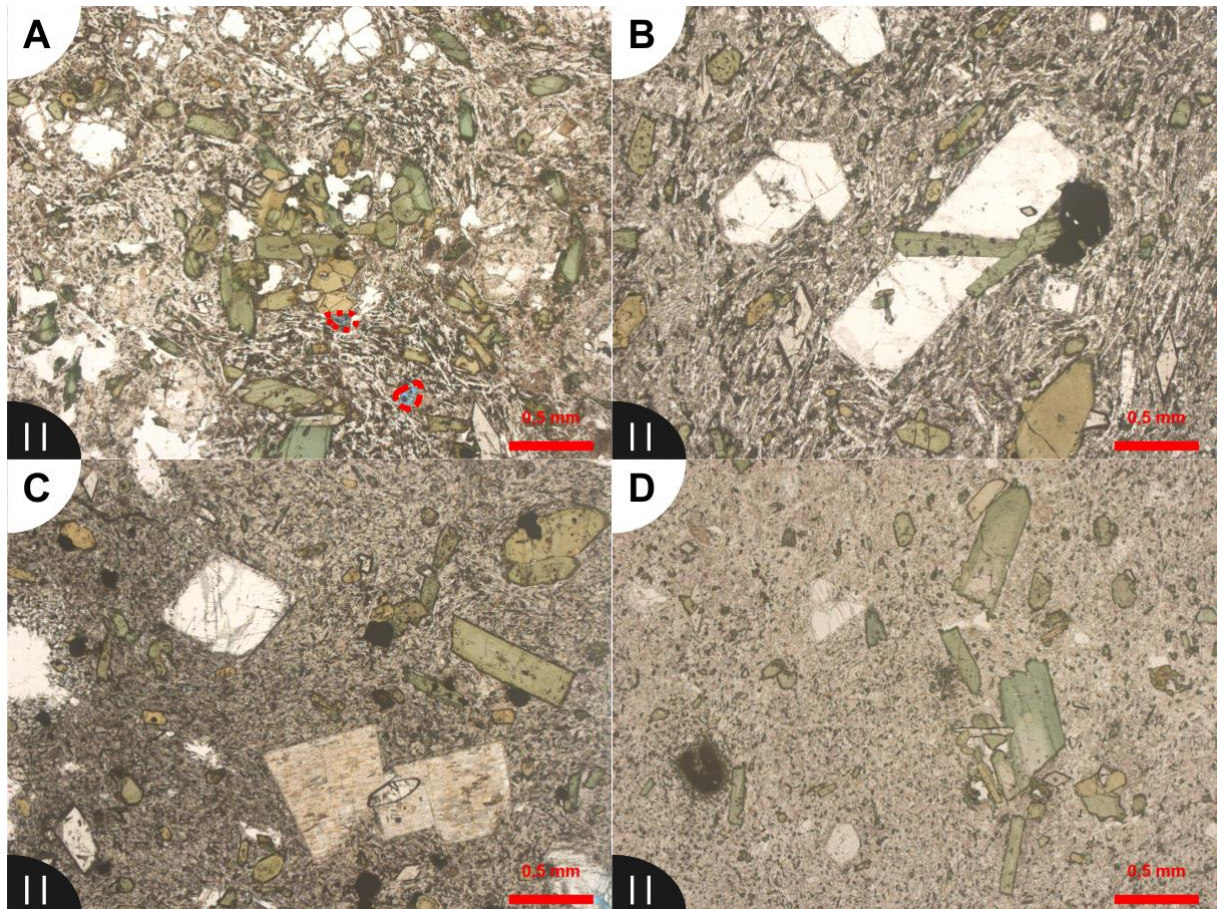


Figura 13 - Fotomicrografias da litofácies fonólitos maciços (Pm). As rochas não possuem nenhum tipo de porosidade primária. As linhas vermelhas tracejadas indicam a microporosidade secundária móldica local (A). II=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostras: A) APA-02; B) APA-06; C) APA-04; D) APA-17;

Fonte: O autor.

4.3.2 *Fonólitos Vesiculados (Pv)*

Esta litofácies é definida por uma única amostra, aflorante em dique, que apresenta textura porfirítica e estrutura vesiculada. A rocha é hipocristalina e possui fluxo ígneo marcado pelos fenocristais de feldspatos. As vesículas são espaçadas e predominantemente estiradas (Figura 14), indicando fluxo ígneo preferencial que circunda os fenocristais, e apresentam contatos irregulares com a massa cristalina da rocha. Os poros possuem de 0,1 a 2 mm de comprimento no seu maior eixo, e não apresentam conectividade aparente. Alguns poros estão parcialmente preenchidos, próximos aos seus limites, por argilominerais, carbonatos e/ou zeólitas. A petrografia estima uma porosidade original de 5-7% e atual entre 2-4%. Portanto, interpreta-se

essa litofácies como intrusão rasa coerente de viscosidade alta, supersaturada em voláteis, e com alta taxa de resfriamento final.

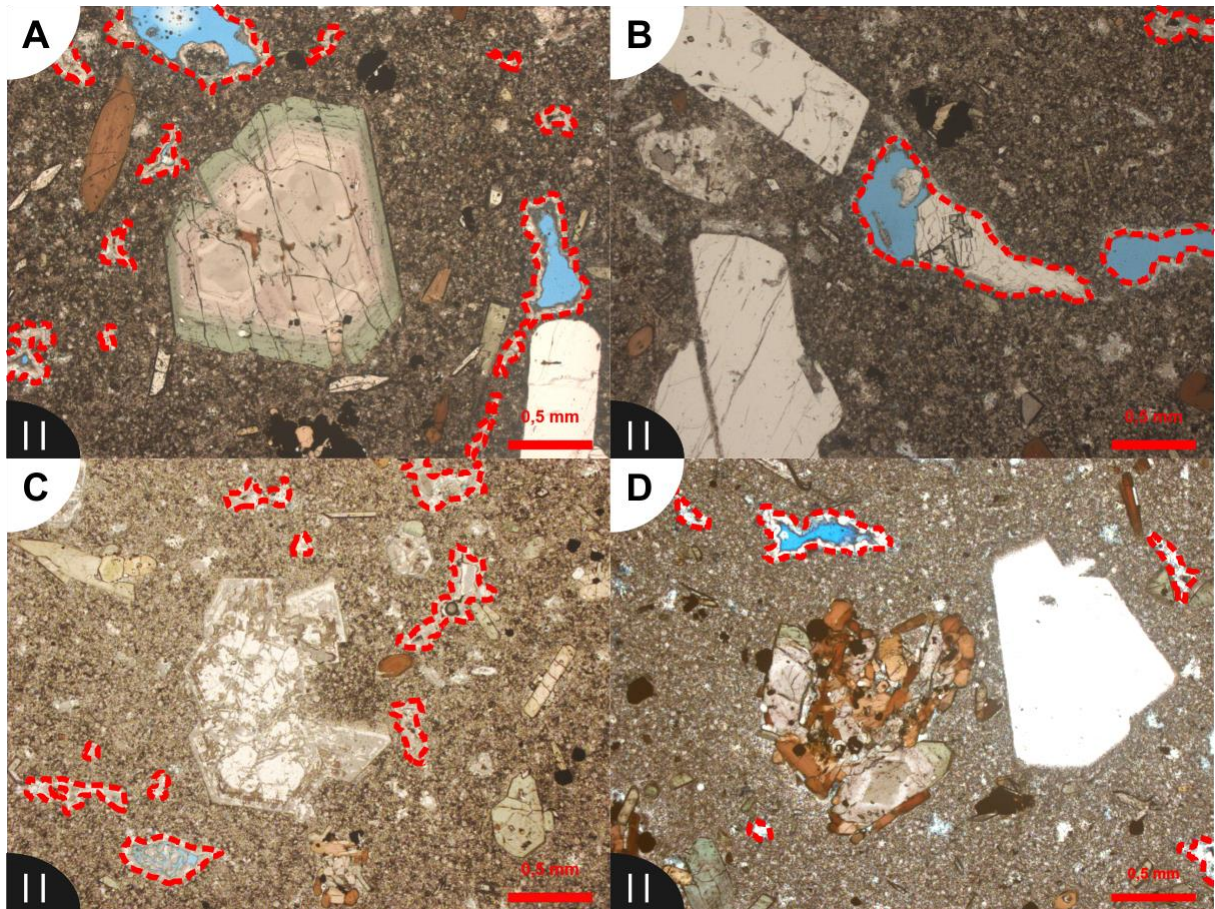


Figura 14 - Fotomicrografias da litofácies fonólitos vesiculados (Pv). As linhas vermelhas tracejadas indicam a porosidade vesicular original, com preenchimento parcial secundário. ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: DIQ-05.

Fonte: O autor.

4.3.3 *Lamprófiros Maciços (Lm)*

Esta litofácies é definida por uma única amostra (Figura 15) de textura porfirítica e hipocristalina, com estrutura predominantemente maciça e sem porosidade primária aparente. Essa rocha intrude como dique de pouca espessura e não apresenta indicação de fluxo ígneo. Ao longo da rocha e em alguns cristais, nota-se fraturamento local preenchido por carbonatos. Portanto, interpreta-se essa litofácies como intrusão

rasa coerente de viscosidade baixa, sem supersaturação em voláteis, e com taxa alta de resfriamento final.

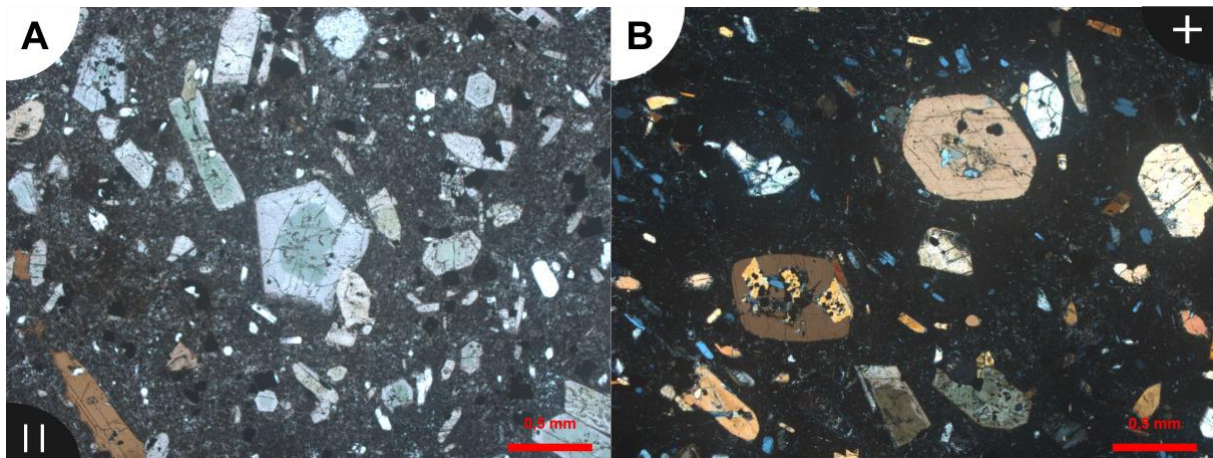


Figura 15 - Fotomicrografias da litofácies lamprófiros maciços (Lm). As rochas não possuem nenhum tipo de porosidade aparente. ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostra: APA-10.

Fonte: O autor.

4.3.4 *Lamprófiros Amigdaloides (La)*

Esta litofácies é definida por uma única amostra (Figura 16), intrudida sob forma de diques, que apresenta textura porfírica e estrutura vesiculada totalmente preenchida. A rocha é hipocristalina e possui incipiente orientação preferencial de cristais, marcado pela orientação dos microfenocristais. As vesículas ocorrem moderadamente espaçadas e predominantemente estiradas, com contatos retos com a massa cristalina da rocha. A ocorrência das amígdalas é alinhada com alguns dos microfenocristais. Porém, dependendo da seção de análise, pode-se descrever originalmente vesículas esféricas. As vesículas/amígdalas possuem preenchimento secundário total por carbonatos, nos limites externos, e por material isotrópico (zeólitas), em seus interiores. As amígdalas estiradas possuem até 5 mm de comprimento no seu maior eixo, enquanto as vesículas esféricas possuem dimensões máximas de 1 mm. A petrografia estima uma porosidade original entre 8-11% e atual de 0%. Embora preenchidas, as amígdalas não possuem fraturamento aparente. Portanto, interpreta-se essa litofácies como intrusão rasa coerente de viscosidade média/baixa, supersaturada em voláteis, com alta taxa de resfriamento final e com percolação de fluidos secundários.

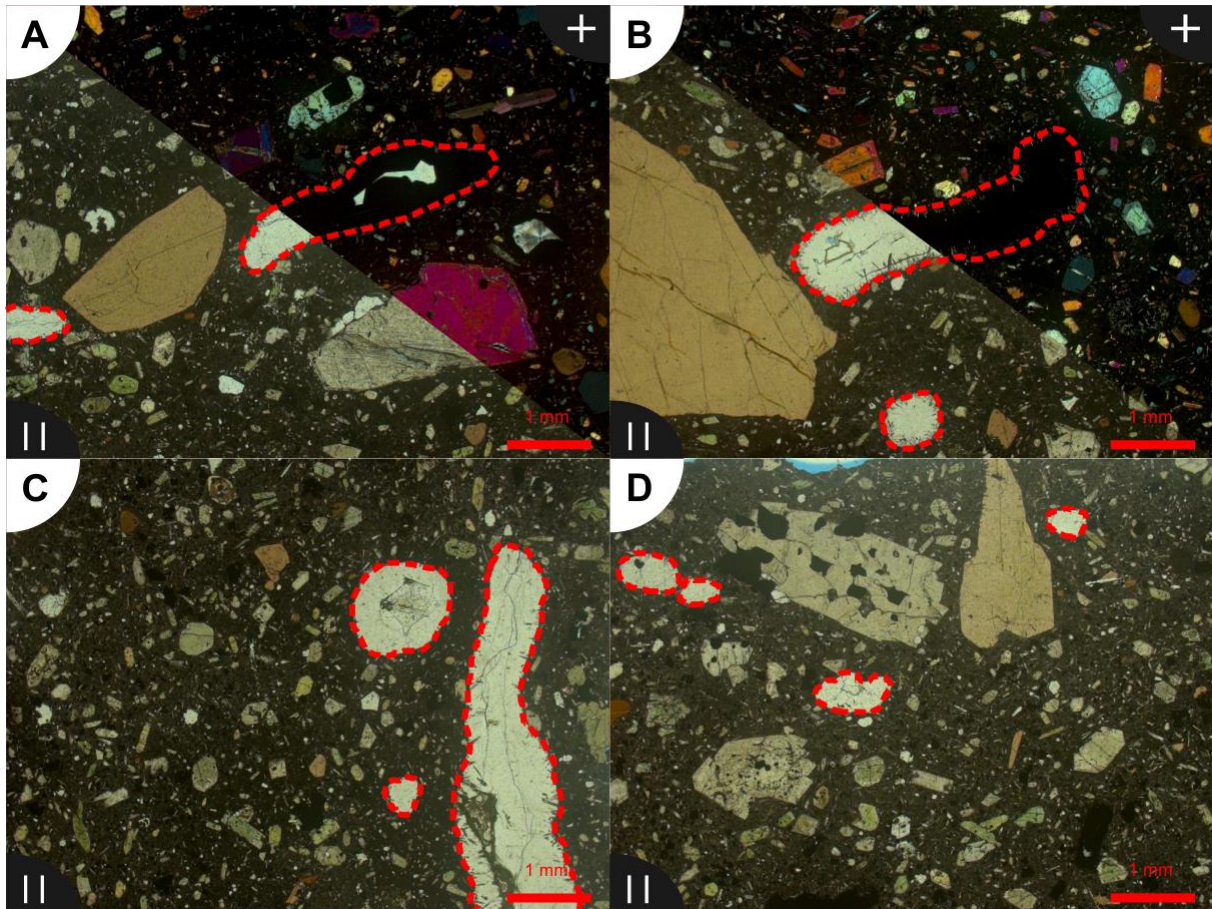


Figura 16 - Fotomicrografias da litofácies lamprófiros amigdaloides (La). As linhas vermelhas tracejadas indicam a porosidade vesicular original, com preenchimento secundário total. ||=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: DIQ-07.

Fonte: O autor.

4.3.5 *Feldspatoiditos Fraturados (Ff)*

Os nefelinitos e sodalinitos foram agrupados na mesma litofácies por pertencerem a uma mesma classe modal, com mineralogia e características texturais bastante semelhantes. Esta litofácies abrange 4 amostras e apresenta rochas hipocristalinas com textura porfírica e estrutura fraturada (Figura 17), sem porosidade primária aparente. Essas rochas também intrudem como diques rasos de pouca espessura e não apresentam indicação de fluxo ígneo. As fraturas possuem em média pequena abertura e, por vezes, estão preenchidas por materiais secundários. Algumas partes das rochas não estão fraturadas, dando a impressão de serem maciças. A petrografia estima uma porosidade original de 0% e atual de 1-2%. Na

Figura 17D, nota-se fratura aberta com pequena movimentação associada e ausência de preenchimento. Isso indica um provável erro de laminação, denominada de porosidade artefato. Com pouca atenção, esse erro pode aumentar os valores estimados de porosidade. Localmente, também ocorre porosidade intrapartícula em cristais de olivina (Figura 17 C). Portanto, interpreta-se essa litofácies como intrusão rasa coerente e fraturada, de viscosidade baixa, sem supersaturação em voláteis, e com taxa alta de resfriamento final.

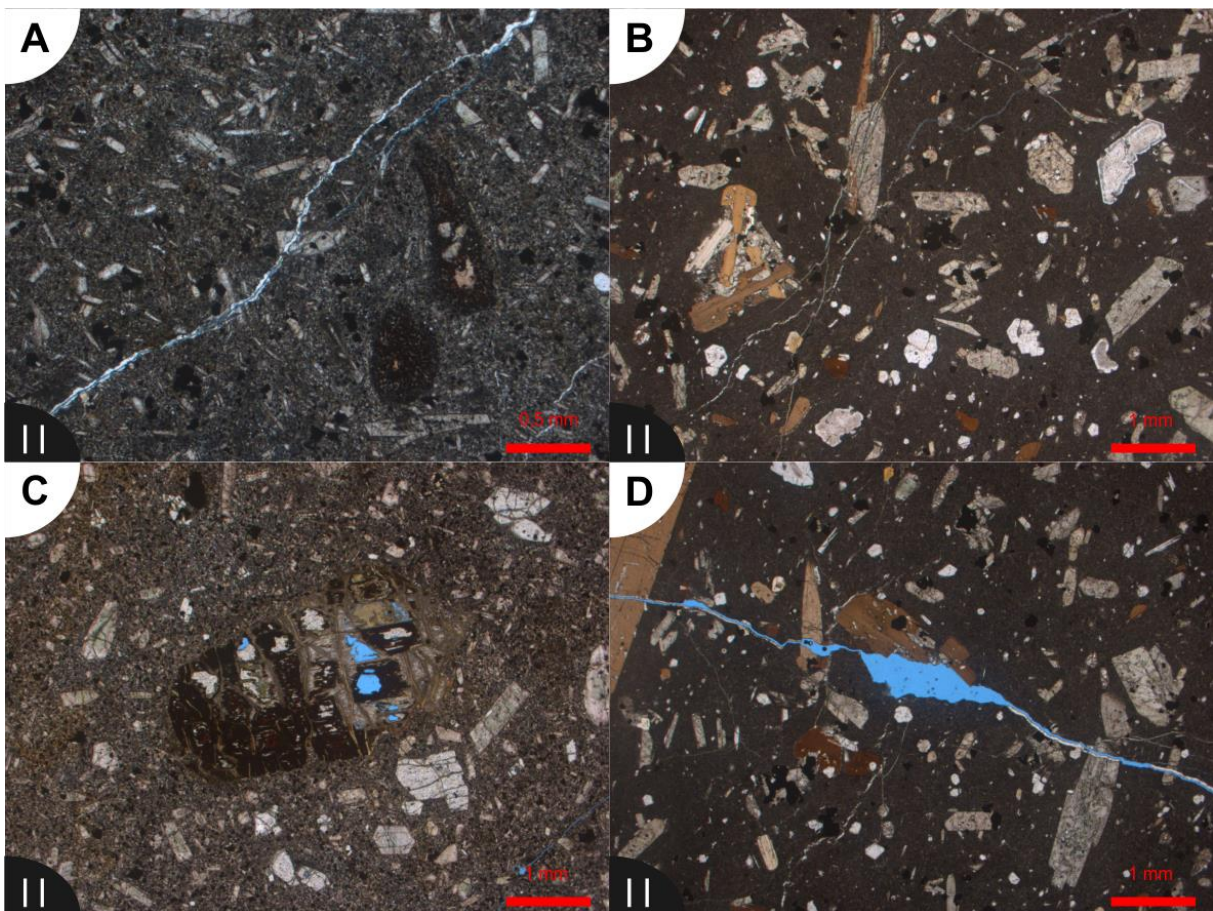


Figura 17 - Fotomicrografias da litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff). Os nefelinitos (A e B) e os sodalititos (B e C) possuem estrutura fraturada. Porosidade intrapartícula (C) e artefato (D) são encontradas localmente. II=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular; Amostra: A: DIQ-01; C) DIQ-06; B e D) DIQ-03;

Fonte: O autor.

4.3.6 Nefelinitos Vesiculados (Fv)

Esta litofácies é definida por uma única amostra e apresenta textura porfirítica e estrutura bastante vesiculada (Figura 18). Essa rocha é hipocristalina, ocorre sob

forme de diques e não possui evidências de fluxo ígneo. As vesículas são frequentes e possuem forma, geometria e contatos irregulares com a massa cristalina da rocha, variando de estiradas a esféricas. Os poros possuem dimensões variáveis, de 0,2 a 8 mm de comprimento no seu maior eixo, e não apresentam conectividade aparente. Alguns poros estão parcialmente ou totalmente preenchidos, próximos aos seus limites, principalmente por zeólitas, mas também por carbonatos. A petrografia estima uma porosidade efetiva original de 16-20% e atual de 13-17%. Portanto, interpreta-se essa litofácies como intrusão rasa coerente de viscosidade baixa/média, supersaturada em voláteis, e com alta taxa de resfriamento final.

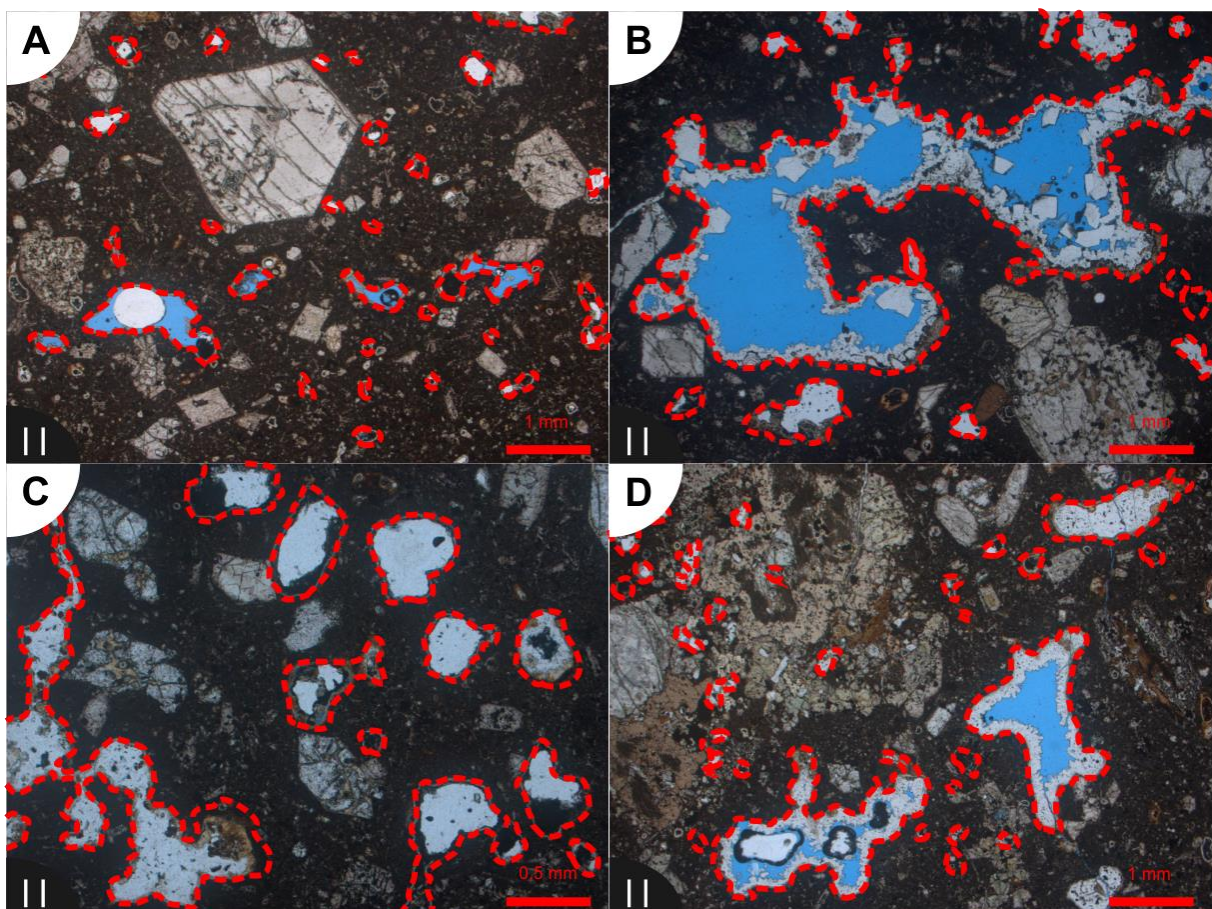


Figura 18 - Fotomicrografias da litofácies nefelinitos vesiculados (Fv). As linhas vermelhas tracejadas indicam a elevada porosidade vesicular preservada. II=Luz Polarizada Paralela; +=Luz Polarizada Perpendicular. Amostra: DIQ-04.

Fonte: O autor.

4.4 Microtomografia Computadorizada de Raios X

Esta técnica permite uma melhor avaliação das faciologias em complementação aos dados de petrografia, detalhando o sistema permo-poroso 3D. Nesta seção, são apresentados os dados obtidos por microtomografia computadorizada de raios X.

Foram analisadas 6 amostras de 5 diferentes fácies (*Tabela 4*): fonólitos maciços (Pm), fonólitos vesiculados (Pv), lamprófiros maciços (Lm), feldspatoiditos fraturados (Ff) e lamprófiros amigdaloides (La). Não foi possível realizar análise nas amostras da litofácies feldspatoiditos vesiculares (Fv) devido à baixa coesão e fácil fragmentação da amostra.

| Amostras | Litologia | Código | Microtomografia |
|----------|------------|--------|-----------------|
| APA - 01 | Fonólito | Pm | V |
| APA - 02 | Fonólito | Pm | V |
| APA - 04 | Fonólito | Pm | - |
| APA - 06 | Fonólito | Pm | V |
| APA - 10 | Lamprófiro | Lm | V |
| APA - 16 | Fonólito | Pm | - |
| APA - 17 | Fonólito | Pm | - |
| DIQ - 01 | Nefelinito | Ff | - |
| DIQ - 02 | Nefelinito | Ff | - |
| DIQ - 03 | Sodalitito | Ff | V |
| DIQ - 04 | Nefelinito | Fv | - |
| DIQ - 05 | Fonólito | Pv | - |
| DIQ - 06 | Nefelinito | Ff | - |
| DIQ - 07 | Lamprófiro | La | V |

V = Técnica realizada; - = Técnica não realizada.

Tabela 4 - Amostras e litofácies analisadas em microtomografia computadorizada de raios X.

Fonte: O autor.

A litofácies fonólitos maciços (Pm) é predominantemente homogênea em microtomografia, com densidade de rocha média/alta. Na reconstrução 3D das

imagens (Figura 19), observa-se zonas circulares avermelhadas de mais baixa densidade quando comparadas ao restante da amostra. Também se descreve pequenas zonas de densidade mais elevada na cor amarela/azul. É possível observar fenocristais de feldspatos zonados com diferenças internas de densidade. Para esta litofácies, não há indício de qualquer tipo de porosidade.

A litofácies fonólitos vesiculados (Pv) apresenta uma estrutura heterogênea e massa cristalina de densidade de rocha média/alta. Na reconstrução 3D das imagens (Figura 20), observa-se zonas roxas circulares de baixa densidade com contatos geralmente retos com a massa cristalina da rocha. Essas zonas podem ser classificadas como as vesículas da rocha, que são irregulares quanto à continuidade da forma e elipsoidais/estiradas quanto à geometria. Aparentemente as vesículas não têm ligações umas com as outras, indicando ocorrências isoladas. Adicionalmente, é possível descrever a zonação dos fenocristais de feldspatos, assim como zonas corroídas internas e externas.

A litofácies lamprófiros maciços (Lm) é predominantemente homogênea, com densidade de rocha alta. Na reconstrução 3D das imagens (Figura 21), nota-se várias pequenas áreas azuis, predominantemente equidimensionais, de densidade ainda mais elevada quando comparado à massa cristalina. Pontualmente, ocorre zona vermelha de baixa densidade com faces retas. A concentração de tons amarelo/verdes somente na borda do cilindro indica provavelmente intervalo de erro analítico, natural para materiais de mais elevada densidade. Portanto, para esta litofácies, não há indício de qualquer tipo de porosidade.

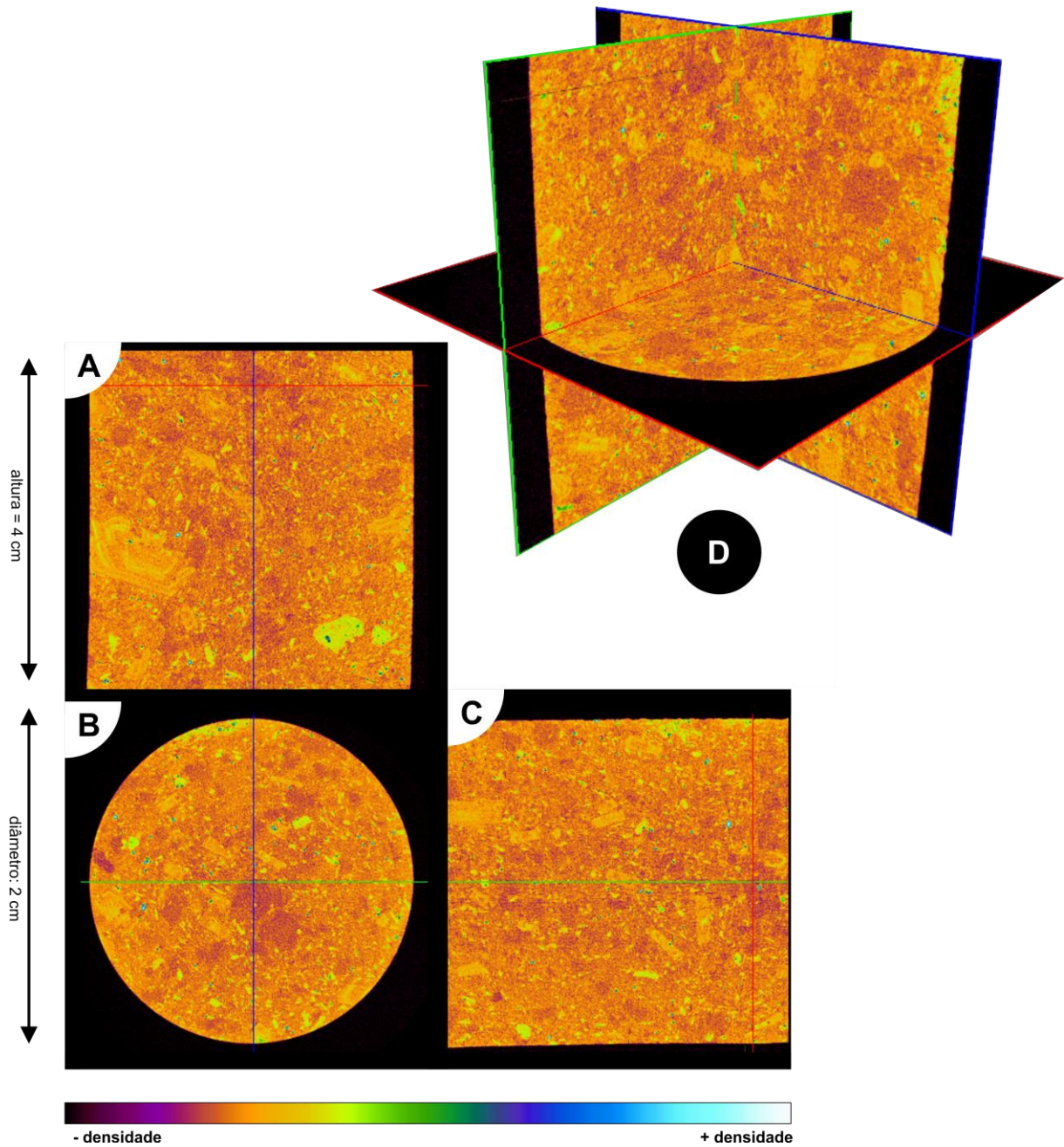


Figura 19 - Reconstrução 3D (D) da litofácies fonólitos maciços (Pm) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A amostra é homogênea e não há indícios de porosidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-06.

Fonte: O autor.

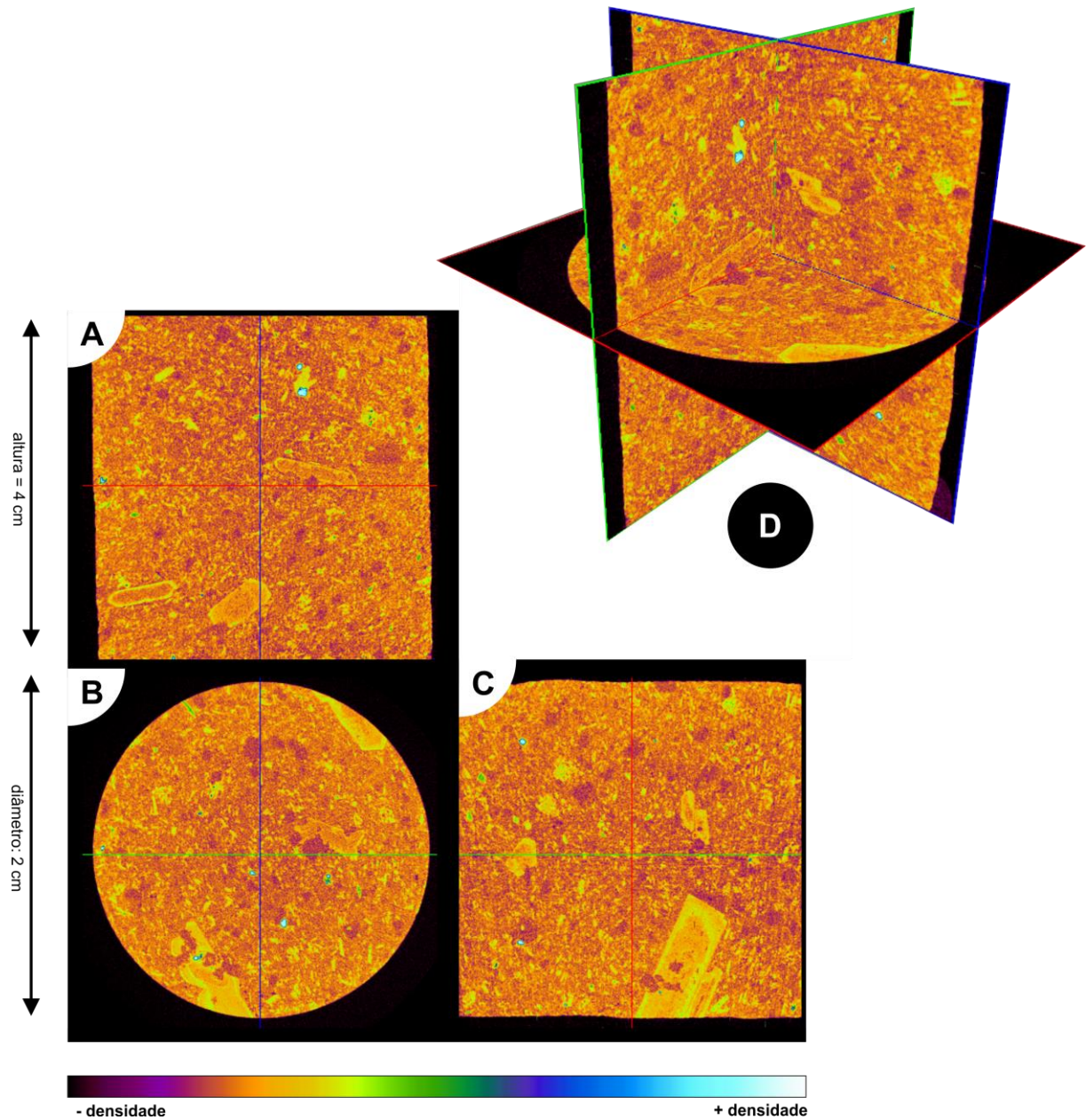


Figura 20 - Reconstrução 3D da litofácies fonólitos vesiculados (Pv) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha possui vesículas não conectadas. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-02.

Fonte: O autor.

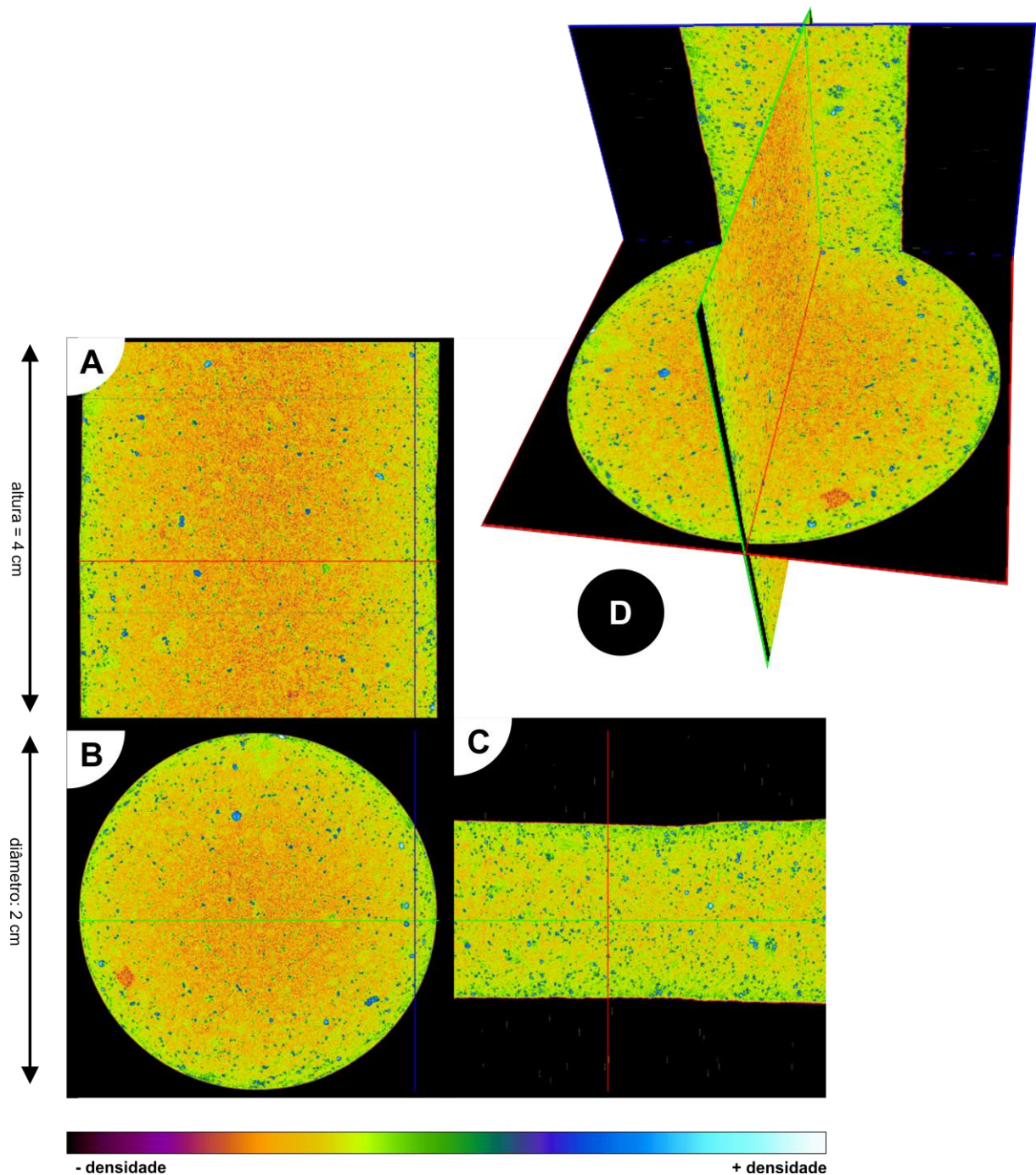


Figura 21 - Reconstrução 3D da litofácies lamprófiros maciços (Lm) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha é densa e homogênea e não há indícios de porosidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: APA-10.

Fonte: O autor.

A litofácies lamprófiros amigdaloides (La) é heterogênea e apresenta densidade de rocha elevada. Na reconstrução 3D das imagens (Figura 22), observam-

se zonas roxas/vermelhas/laranjas estiradas de formatos irregulares e contato reto com a massa cristalina amarela. Essas zonas parecem estar alinhadas com um fluxo preferencial, indicando provavelmente porosidade por vesículas. Nas zonas de vesículas, há coloração predominantemente laranja para amígdalas estreitas e laranja/roxa/vermelha para amígdalas mais espessas. Na esquerda superior da Figura 22 A, há zona de coloração predominantemente laranja claro, com contato interdigitado com o restante da rocha e formato arredondado. Ocorrem também zonas azuis de alta densidade com faces retas e hábito equidimensional. Nota-se pequeno fraturamento da amostra formando linhas de coloração roxa.

A litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff) é heterogênea e possui densidade de rocha média/alta, porém mais elevada quando comparada às litofácies Pm e Pv. Na reconstrução 3D das imagens (Figura 23), nota-se zonas roxas de baixa densidade com faces arredondadas a retas e contatos retos com a massa cristalina. É possível também descrever pontos predominantemente equidimensionais de coloração azul/verde. Na direita inferior da Figura 23 B e C, são observadas algumas fraturas ligadas umas às outras, identificadas por linhas de coloração roxa. Para esta litofácies, há a possibilidade para ocorrência de porosidade e permeabilidade.

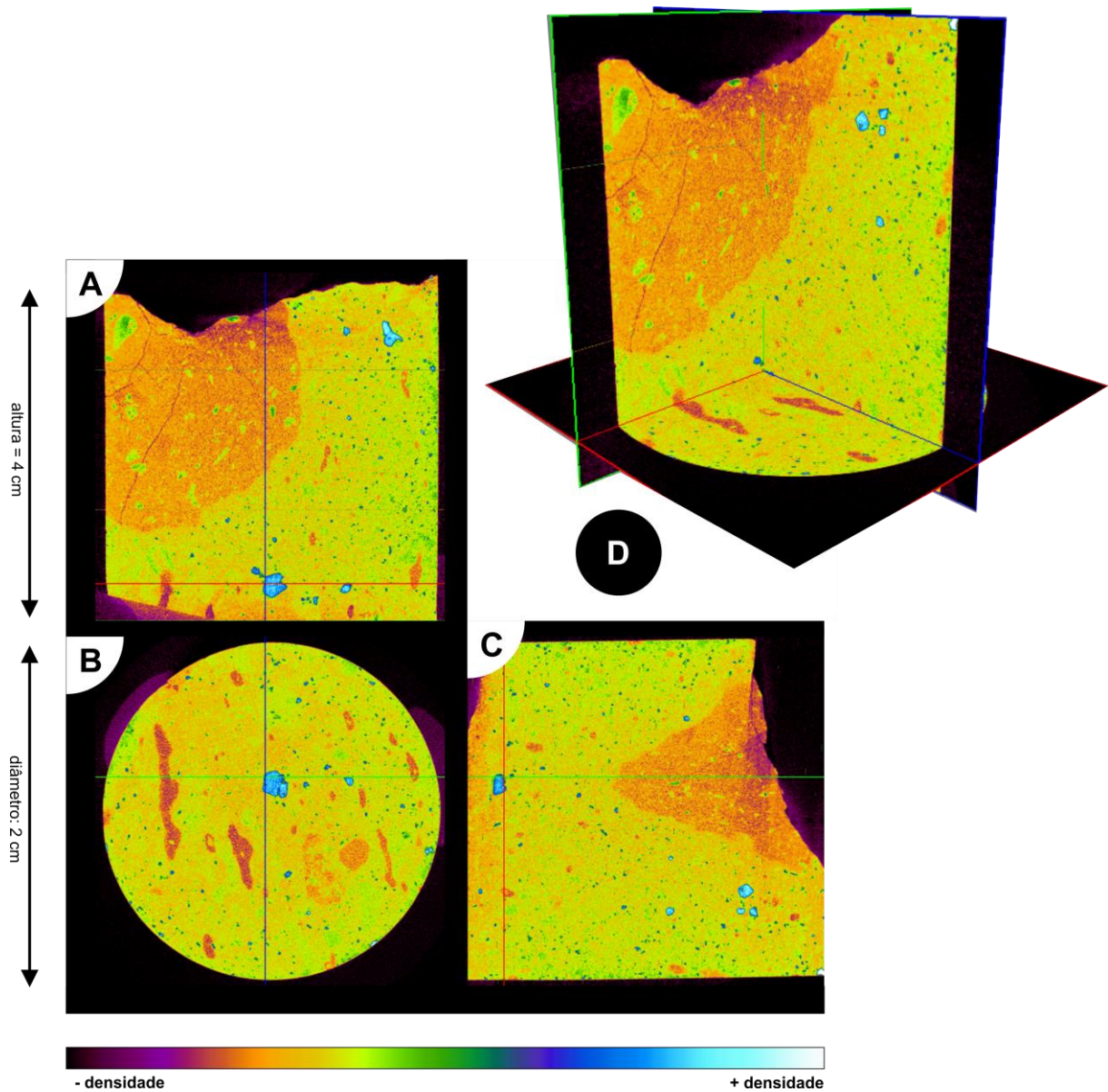


Figura 22 - Reconstrução 3D da litofácies lamprófiro amigdalóide (La) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. A rocha possui densidade elevada e amígdalas preenchidas por minerais de baixa densidade. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: DIQ-07.

Fonte: O autor.

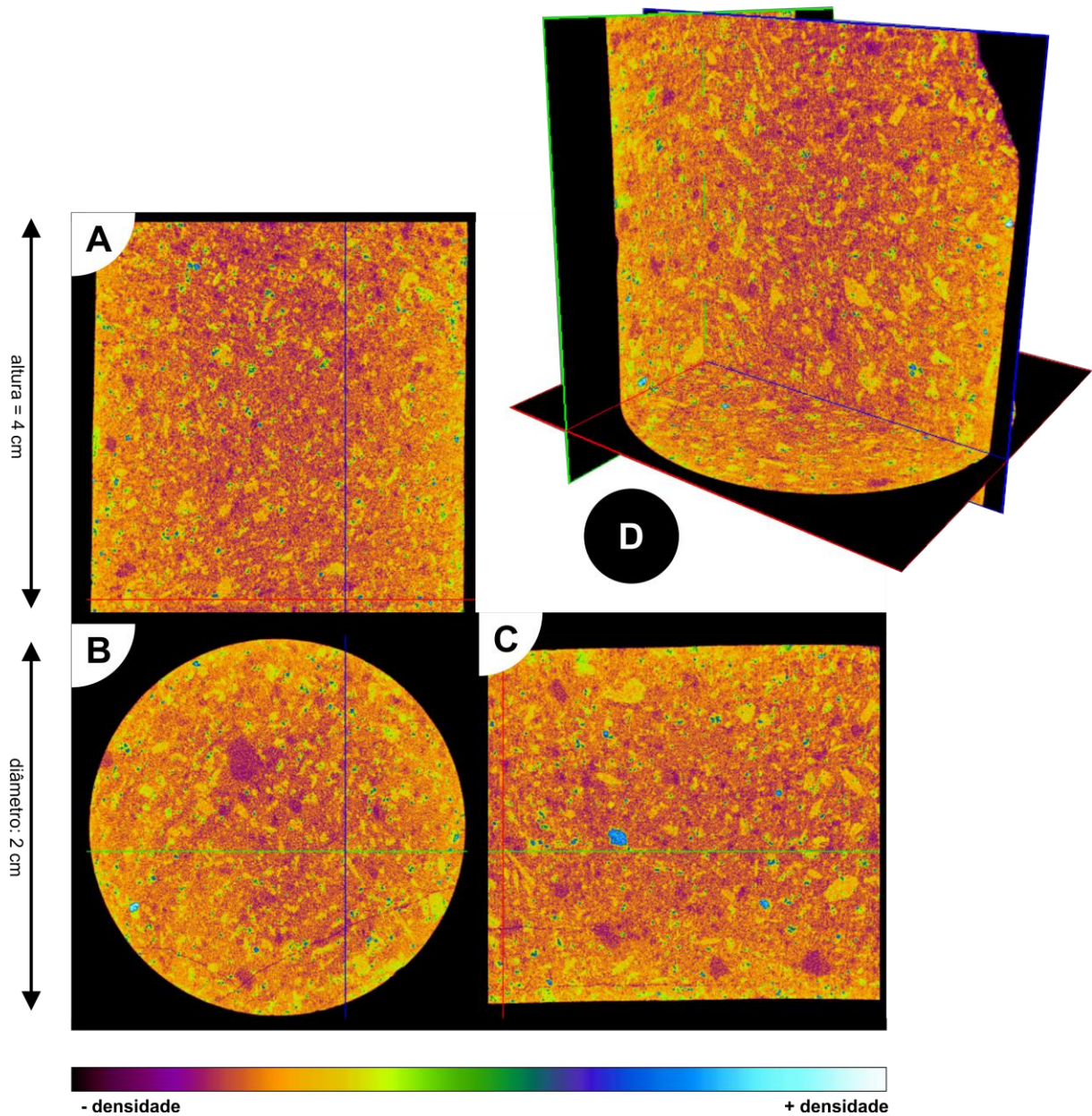


Figura 23- Reconstrução 3D da litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff) obtida por Microtomografia Computadorizada de Raios X. As zonas de baixa densidade são geradas provavelmente pelas sodalitas. A) Paralelo à Z; B) Paralelo à X e Y; C) Paralelo à X. Amostra: DIQ-03.

Fonte: O autor.

5. DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão discutidos, com base nos resultados, a influência dos modos de colocação e composições na porosidade, os dados de microtomografia e, por fim, os padrões de porosidade para as rochas subvulcânicas do Complexo Trindade.

5.1 Modos de Colocação e Composições

No Complexo Trindade, as composições nefeliníticas, lamprofíricas, sodalíticas e fonolíticas ocorrem sob determinados tipos de *emplacement*. Os fonólitos ocorrem sob forma de *necks*, *plugs* e diques, enquanto as outras composições ocorrem somente sob forma de diques. As ocorrências tabulares tendem a indicar magmas com composições de temperaturas elevadas e/ou de viscosidades mais baixas, facilitando a movimentação, percolação e intrusão. Já sistemas de *necks* e *plugs*, por definição, indicam intrusão em zonas frágeis e frias, gerando cristalização lenta, margens resfriadas e tendência para composições mais viscosas.

Os voláteis dissolvidos diminuem a viscosidade dos magmas, principalmente em magmas alcalinos mesocráticos a melanocráticos, como os lamprófiros, principalmente, e os nefelinitos. Os lamprófiros são composições naturalmente ricas em voláteis (ROCK, 1987) que, em subsuperfície, podem se manifestar na forma de vesiculação precoce. A descompressão do magma ascendente gera a supersaturação de voláteis. Já em composições com ocorrência de feldspatos alcalinos e/ou feldspatoides, como nefelinitos e fonólitos, a vesiculação, quando ocorre, se dá em intrusões bastante rasas. Este caso melhor se aplica aos fonólitos.

Contudo, outros fatores podem influenciar na geração de porosidade primária em rochas subvulcânicas, tais como a espessura dos corpos ígneos. Nas rochas nefeliníticas e lamprofíricas do Complexo Trindade, as intrusões geralmente não ultrapassam 1 metro de espessura. O contato de magmas pouco espessos e de baixa viscosidade com rochas encaixantes resfriadas pode gerar (1) disjunções colunares e (2) resfriamento, hipocristalinidade e rápida cristalização de micrólitos, com supersaturação de voláteis subsequente – alta taxa de resfriamento. A contínua movimentação do magma ascendente após contato com a encaixante gera vesículas

esféricas a estiradas (*deformation vesicles*), dependendo do contraste de temperatura. Este parece ser o caso de alguns nefelinitos e lamprófiros estudados.

A petrografia indica que esses magmas possuem complexos processos magmáticos. As texturas em peneira (*sieved texture*), presentes em sanidinas e piroxênios, indicam processos de rápida descompressão e/ou mistura de magmas (*magma mixing*), com base em texturas em peneira descritas para plagioclásios (TSUCHIYAMA, 1985; NELSON; MONTANA, 1992). Essas feições podem gerar antecristais e autocristais (ZELLMER, 2021), assim como as zonações observadas.

5.2 Microtomografia Computadorizada de Raios x

As análises de microtomografia permitiram a visualização da continuidade das litofácies e condicionaram sugestões acerca de possibilidades anteriormente não descritas em lâmina delgada. Na microtomografia, as litofácies fonólitos maciços (Pm) e feldspatoiditos fraturados (Ff), descrita como sem porosidade, apresentam áreas predominantemente arredondadas, equidimensionais e de baixa densidade que poderiam levar à interpretação de porosidade primária. Contudo, as amostras DIQ-03 e APA-06, respectivamente sodalitito e fonólito, apresentam grande quantidade de minerais do grupo da sodalita, por vezes alterados para zeólitas e carbonatos. Esses minerais pertencem ao sistema cúbico e, portanto, possuem hábitos equidimensionais ou arredondados, dependendo da escala e dos processos envolvidos. As sodalitas possuem densidade média de 2,27–2,33 g/cm³ (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2013), sendo contrastante com os feldspatos (2,56 g/cm³), piroxênios cálcicos (3,22–3,56 g/cm³) e zeólitas (2,1–2,3 g/cm³).

O arredondamento dos cristais, que sugeriram vesiculação, pode ser atribuído à (1) zonação composicional interna, com limites arredondados e composições externas levemente mais densas, não gerando contraste suficiente, (2) cristais que sofreram processos de corrosão externa ao longo da ascensão magmática ou (3) escala e resolução da análise de microtomografia, visto que, por serem equidimensionais, os cristais poderiam apresentar-se arredondados de acordo com a forma dos grãos e/ou seção de análise. Visto que a escala do microtomógrafo é proporcional às densidades, o autor atribui a ocorrência dessas zonas de baixa densidade como minerais do grupo da sodalita ou sodalitas zeolitizadas, gerando importante contraste. Essas litofácies, portanto, não apresentam porosidade primária.

Comumente, ocorrem zonas e/ou agregados de alta densidade, como observado nas litofácies Pm e Lm. Na litofácies fonólito maciço (Pm), pequenos agregados com essas características ocorrem. Essas rochas, em lâmina petrográfica, apresentam variados enclaves máficos com concentração de minerais de densidade mais elevada quando comparados aos feldspatos, tais como clinopiroxênios cálcicos ($3,22\text{--}3,56\text{ g/cm}^3$), anfibólios ($3\text{--}3,5\text{ g/cm}^3$), apatitas ($3,1\text{--}3,35\text{ g/cm}^3$) e espinélios ($3,5\text{--}5,3\text{ g/cm}^3$), segundo (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2013). Portanto, o autor atribui essas anomalias positivas de densidade aos enclaves e/ou agregados máficos/ultramáficos alcalinos. Nos lamprófiros maciços (Lm), ocorrem pontos equidimensionais de alta densidade e zona anômala de baixa densidade em microtomografia. Em lâmina delgada, essa litofácies apresenta microfenocristais de minerais máficos e minerais do grupo do espinélio, provavelmente titanomagnetitas ou ulvoespinélios. A rocha é majoritariamente composta por minerais máficos, que possuem densidade mais baixa quando comparado aos espinélios. Por isso, o autor propõe que as anomalias de alta densidade nessa litofácies indicam provavelmente a ocorrência de minerais do grupo dos espinélios. Já a fração de baixa densidade possui faces retas, o que corrobora para a presença de um mineral félsico. Visto que os lamprófiros (1) possuem densidade elevada devido às fases minerais presentes e que (2) não apresentam mineralogia félsica, a zona de baixa densidade provavelmente indica um enclave/xenocristal de feldspato ou feldspatoide.

Na litofácies lamprófiros amigdaloides (La), ocorrem zonas de baixa densidade roxas/vermelhas com geometria estirada/elipsoidal. Comparando-se com as descrições petrográficas, essas feições representam a vesiculação do sistema e a viscosidade do meio. Nota-se que mesmo a rocha sendo amigdaloides, a densidade do preenchimento das amígdalas maiores é muito baixa, semelhante a espaços vazios, enquanto que das amígdalas menores é baixa a média, confirmando as duas fases de preenchimento distintas vistas em lâmina. Também ocorrem zonas alaranjadas arredondadas de até 1 cm, texturalmente diferentes e com contatos retos a graduais. O autor propõe que essas zonas provavelmente indicam a presença de enclaves. Esses enclaves não são observados em lâmina petrográfica, porém a forma arredondada sugere fusão e/ou reabsorção das bordas e a relativa baixa densidade indica que essa fração é um enclave/xenólito de composição félsica. Já os pontos azuis de alta densidade indicam a presença provável de minerais do grupo dos espinélios, assim como foi descrito para a litofácies Lm.

5.3 Padrões de Porosidade

As definições composicionais e de litofácies para as rochas subvulcânicas do Complexo Trindade indicam que há diferentes padrões de porosidade (*Tabela 5*), podendo ser dividido entre (1) rochas porosas e (2) rochas não porosas, com base na porosidade atual. As rochas descritas são coerentes e apresentam porosidade primária controlada pela supersaturação dos sistemas ígneos, gerando vesiculação, e porosidade secundária local, intrapartícula a móldica e por fraturamento. A geometria e arranjo das vesículas pode sugerir a viscosidade e o modo de *emplacement*.

| Código | Litofácies | Grupo | Porosidade Original (%) | Porosidade Atual (%) |
|--------|----------------------------|-------------|-------------------------|----------------------|
| Pm | Fonólitos Maciços | | 0 | 0 |
| La | Lamprófiros Amigdaloides | Não Porosas | 8-11 | 0 |
| Lm | Lamprófiros Maciços | | 0 | 0 |
| Ff | Feldspatoiditos Fraturados | | 0 | 1-2 |
| Fv | Nefelinitos Vesiculados | Porosas | 16-20 | 13-17 |
| Pv | Fonólitos Vesiculados | | 5-7 | 2-4 |

Tabela 5 - Padrões de porosidade atuais para as litofácies subvulcânicas do Complexo Trindade.

Fonte: O autor.

Os fonólitos que intrudem sob a forma de *necks* e *plugs* pertencem exclusivamente à litofácies fonólitos maciços (Pm). Essas rochas são intrusões rasas viscosas que não possuem indícios significativos de porosidade primária ou secundária em lâmina delgada. Em microtomografia, a amostra também não apresenta porosidade ou permeabilidade. Portanto, em um sistema petrolífero análogo, essa litofácies apresentaria os requisitos para compor uma rocha selante.

A litofácies fonólitos vesiculados (Pv) ocorre na forma de diques e possui vesículas de 0 a 2 mm, como porosidade estimada de 2-4%. Em microtomografia,

observa-se que não há qualquer fraturamento notável e/ou conexão entre as vesículas, apesar do preenchimento parcial por minerais secundários, descrito em lâmina delgada. Isso sugere a provável não permeabilidade do sistema. A viscosidade desses sistemas tende a ser elevada, devido à vesiculação irregular e estirada, provavelmente tardia, e ao alinhamento de fenocristais. Portanto, essa litofácies, da forma em que está apresentada, não é adequada para o armazenamento de fluidos como água, óleo e/ou gás, mas sim para rocha selante. Contudo, a rocha pode apresentar bom potencial para reservatório se estiver fraturada em profundidade.

Os lamprófiros amigdaloides (La) intrudem como diques pouco espessos. As rochas possuíam originalmente vesículas esféricas a estiradas de até 5 mm, com boa capacidade de geração de porosidade primária (8-11%). Contudo, o preenchimento total por minerais secundários nessas rochas selou completamente a porosidade. A geometria da vesiculação indica que a supersaturação foi gerada em resposta ao contato com as rochas encaixantes (*deformation vesicles*). Em microtomógrafo, não se visualiza os indícios de conexão que preencheram os poros. Portanto, essa litofácies apresenta as condições adequadas de selante em um possível sistema petrolífero.

As rochas da litofácies feldspatoiditos fraturados (Ff) ocorrem exclusivamente na forma de diques e apresentam fraturas/juntas de pouco/nenhum deslocamento, com abertura <0,1 mm. As litofácies Ff, tanto sodalititos quanto nefelinitos, foram colocadas originalmente maciças. A petrografia descreve fraturamento constante, principalmente na matriz hipocristalina, possivelmente gerado por (1) disjunções colunares, (2) hidratação do vidro e quebra ou (3) fraturamento tectônico/erosional posterior. O fraturamento da litofácies Ff também é vista em microtomografia e apresenta continuidade, podendo gerar boa permeabilidade e transmissibilidade de fluidos. Com este padrão ocorrendo em todo o corpo ígneo, essa litofácies tende a ser um reservatório de capacidade moderada.

As litofácies pertencentes aos lamprófiros maciços (Lm) afloram como diques predominantemente homogêneos e pouco espessos, sem ocorrência de porosidade primária. Desta forma, esse conjunto de rochas possuem provável viscosidade baixa e alta taxa de resfriamento, devido à matriz hipocristalina, critérios composicionais e ausência de texturas de fluxo. Embora possa visualizar-se em lâmina delgada algumas fraturas dispersas, a microtomografia não sugere quaisquer sinais de

porosidade ou permeabilidade. Portanto, com as condições adequadas, a ocorrência dessa litofácies em um sistema petrolífero indica a presença de possível selante.

A litofácies nefelinitos vesiculados (Fv) possui os melhores atributos de porosidade entre todas as litofácies, com estimativa petrográfica de poros entre 13-17%. As vesículas são irregulares, esféricas a estiradas, indicando sistema pouco a moderadamente viscoso, respectivamente. A petrografia também indica percolação de fluidos secundários, que podem ter selado o contato entre os poros. A ausência de dados de microtomografia impede considerações mais precisas por parte do autor acerca da porosidade/permeabilidade e geometria do conjunto das vesículas. Contudo, obedecendo aos critérios exclusivamente petrográficos, essa litofácies apresenta grande capacidade para armazenamento de água, óleo e/ou gás.

De forma geral, rochas originalmente vesiculadas (Quadro 3) tendem a apresentar os maiores valores de porosidade (Fv, La e Pv). Rochas hipocristalinas que intrudem na forma de corpos ígneos tabulares poucos espessos também possuem as melhores ocorrências de vesiculação (Fv, La, Ff e Pv). Rochas que intrudem na forma de *necks* e *plugs* (Pm) ou que possuem baixa viscosidade *sin-emplacement* (Lm) são maciças e não apresentam porosidade.

| Código | Porosidade Original | Emplacement |
|---------------|----------------------------|--------------------|
| Pm | - | <i>Necks/plugs</i> |
| La | V | Diques |
| Lm | - | Diques |
| Ff | - | Diques |
| Fv | V | Diques |
| Pv | V | Diques |

V = presente; - = não presente.

Quadro 3 - Relação de litofácies com a porosidade original e o modo de colocação das rochas subvulcânicas estudadas.

Fonte: O autor.

6. CONCLUSÕES

A Ilha da Trindade é uma manifestação vulcânica recente na costa brasileira e apresenta rochas vulcânicas a subvulcânicas de composições alcalinas subsaturadas em SiO₂. Para este estudo, foram separadas 14 amostras de rochas subvulcânicas para análise do sistema permo-poroso em (1) lâminas delgadas e (2) microtomógrafo computadorizado de raios X.

A petrografia classificou as rochas subvulcânicas composicionalmente em 3 diferentes classes modais: fonólitos, feldspatoiditos (nefelinitos e sodalititos) e lamprófiros (monchiquitos). Foram definidas também 6 diferentes litofácies: fonólitos maciços (Pm), fonólitos vesiculados (Pv), lamprófiros amigdaloides (La), lamprófiros maciços (Lm), feldspatoiditos fraturados (Ff) e nefelinitos vesiculados (Fv). Amostras das litofácies Pm, Pv, La, Lm e Ff foram analisadas em microtomógrafo e sugerem distribuição de poros espaçados e predominantemente não conectados.

O modelo de padrões de porosidade para as diferentes composições e faciologias de rochas pertencentes ao Complexo Trindade indica que a porosidade primária é controlada pela vesiculação. A ocorrência de vesículas em fonólitos, nefelinitos e lamprófiros subvulcânicos depende da composição do magma, tipo e espessura de intrusão, relações com a rocha encaixante, grau de cristalinidade e da viscosidade *sin-emplacment*. Rochas que ocorrem em diques pouco espessos tendem a apresentar maior capacidade para geração de porosidade primária, independente da composição, enquanto que sistemas de colocação em *necks* e *plugs* são predominantemente maciços, restritos a fonólitos.

O resultado final permitiu a utilização do estudo de rochas subvulcânicas como análogo em sistemas petrolíferos não convencionais, principalmente para rochas com padrões composicionais e porosos semelhantes. As litofácies podem ser separadas em 2 grupos: (1) não porosas e (2) porosas. As litofácies Pm, Pv, La e Lm possuem baixa/nenhuma porosidade e se comportariam como rochas selantes. As litofácies Fv e Ff têm boa porosidade, condicionada por vesículas e fraturas, respectivamente. Essas rochas apresentariam atributos para transmissão de fluidos, como água, óleo e gás. A litofácies nefelinitos vesiculados (Fv) apresenta o melhor potencial para rocha reservatório, com porosidades que podem alcançar até 17%.

As amostras estudadas representam uma pequena fração de grandes corpos subvulcânicos, que podem variar lateralmente em textura, estrutura e extensão. Por

isso, o uso dessas litofácies em análogos deve ser utilizado com cuidado. O grupo de pesquisa pretende continuar a investigação acerca dos padrões de porosidade nas rochas que compõe o Complexo Trindade e outras ocorrências.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. **Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM. 197 p., 1961.

ALMEIDA, F. F. M. Ilha de Trindade: Registro de vulcanismo cenozóico no Atlântico Sul. In: Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Queiroz, E. T., Winge, M., Berbert-Born, M. L. C. (Edits.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v.01: 369-377, 2002.

ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terrae Didactica**, v. 2, n. 1, p. 3-18, 2006.

ANP. **Boletim Anual de Preços**. Agência Nacional do petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (S.1.). 2012.

ASMUS, H. E.; PORTO, R. Diferenças nos estágios iniciais da evolução da margem continental brasileira: possíveis causas e implicações. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**. 1980. p. 225-239.

BARATA, C. F.; CAPUTO, M. V. Geologia do petróleo da Bacia do Solimões. O “estado da arte”. In: **4º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**, v. 4, n. 1.1, 2007.

BARRETO, C. J. S.; LIMA, E. F.; GOLDBERG, K. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from the Paraná igneous province, southern Brazil. **Bulletin of Volcanology**, v. 79, n. 4, p. 31, 2017.

BECKER, M.; LIMA, E. F.; WAICHEL, B. L.; MANTOVANI, I. F. 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**, v. 42, n. 3, p. 301-317, 2019.

BONGIOLO, E. M., PIRES, G. L. C., GERALDES, M. C., SANTOS, A. C., & NEUMANN, R. Geochemical modeling and Nd–Sr data links nephelinite–phonolite

successions and xenoliths of Trindade Island (South Atlantic Ocean, Brazil). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 306, p. 58-73, 2015.

BONIN, B.; AZZOUNI-SEKKAL, A.; BUSSY, F.; FERRAG, S. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings. **Lithos**, v. 45, n. 1-4, p. 45-70, 1998.

CAS, R.; WRIGHT, J. **Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions**. Springer Science & Business Media, 2012.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; ZAITSEV, A. N. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. **Elements**, v. 8, n. 5, p. 347-353, 2012.

CHOQUETTE, Philip W.; PRAY, Lloyd C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG bulletin**, v. 54, n. 2, p. 207-250, 1970.

CIOCCARI, G. M.; MIZUSAKI, A. M. P. Sistemas petrolíferos atípicos nas Bacias Paleozoicas Brasileiras—Uma revisão. **Geociências** (São Paulo), v. 38, n. 2, p. 367-390, 2020.

COLOMBIER, M.; WADSWORTH, F. B.; GURIOLI, L.; SCHEU, B.; KUEPPERS, U.; DI MURO, A.; DINGWELL, D. B. The evolution of pore connectivity in volcanic rocks. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 462, p. 99-109, 2017.

CONDIE, K. C. **Mantle plumes and their record in Earth history**. Cambridge university press, 2001.

CONDIE, K. C.; SHEARER, C. K. Tracking the evolution of mantle sources with incompatible element ratios in stagnant-lid and plate-tectonic planets. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 213, p. 47-62, 2017.

CONDIE, K. C. **Earth as an evolving planetary system**. Academic Press, 2021.

CORDANI, U. G. Idade do vulcanismo no oceano Atlântico Sul. **Boletim IGA**, v. 1, p. 09-75, 1970.

DE LUCA, P. H. V.; MATIAS, H.; CARBALLO, J.; SINEVA, D.; PIMENTEL, G. A.; TRITLLA, J.; ESTEBAN, M.; LOMA, R.; ALONSO, J. L. A.; JIMÉNEZ, R. P.; PONTET,

M.; MARTINEZ, P. B.; VEJA, V. Breaking barriers and paradigms in presalt exploration: the Pão de Açúcar discovery (offshore Brazil). In: Merrill, R. K., Stembach C. A. (eds.). **Giant Fields of the Decade 2000-2010 (AAPG Memoir 113)**. Oklahoma, p. 177-193, 2017.

DEER, W; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. London, UK: Longman, 2013.

DEMBICKI, H. (Ed.). **Practical petroleum geochemistry for exploration and production**. Elsevier, 2016.

ERNST, R. E.; BELL, K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites. **Mineralogy and Petrology**, v. 98, n. 1, p. 55-76, 2010.

ERNST, R. E.; LIKANE, D. A.; JOWITT, S. M.; BUCHAN, K. L.; BLANCHARD, J. A. A new plumbing system framework for mantle plume-related continental large igneous provinces and their mafic-ultramafic intrusions. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 384, p. 75-84, 2019.

FAROOQUI, M. Y.; HOU, H.; LI, G.; MACHIN, N.; NEVILLE, T.; PAL, A.; SHRIVASTVA, C.; WANG, Y.; YANG, F.; YIN, C.; ZHAO, J.; YANG, X. Evaluating volcanic reservoirs. **Oilfield Review**, v. 21, n. 1, p. 36-47, 2009.

FISHER, R. V. Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. **Geological Society of America Bulletin**, v. 72, n. 9, p. 1409-1414, 1961.

FITTON, J. G.; UPTON, B. G. J. **Alkaline igneous rocks**. 1987.

FODOR, R. V.; HANAN, B. B. Geochemical evidence for the Trindade hotspot trace: Columbia seamount ankaramite. **Lithos**, v. 51, n. 4, p. 293-304, 2000.

FORNERO, S. A.; MARINS, G. M.; LOBO, J. T.; FREIRE, A. F. M.; LIMA, E. F. 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**, v. 99, p. 156-17, 2019.

GALLAND, O.; BERTELSEN, H. S.; EIDE, C. H.; GULDSTRAND, F.; HAUG, Ø. T.; LEANZA, H. A.; MAIR, K.; PALMA, O.; PLANKE, S.; RABELL, O.; ROGERS, B.; SCHMIEDEL, T.; SOUCHE, A.; SPACAPAN, J. B. Storage and transport of magma in

the layered crust—Formation of sills and related flat-lying intrusions. In: **Volcanic and Igneous Plumbing Systems – Understanding Magma Transport, Storage and Evolution in the Earth's Crust**. Elsevier, p. 113-138, 2018.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITCHELL, J. G. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. **Journal of Petrology**, v. 36, n. 1, p. 189-229, 1995.

GIBSON S. A.; THOMPSON R. M.; WESKA R. K.; DICKIN A. P.; LEONARDOS O. H. Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 126, p. 303-314, 1997.

GILL, R. **Igneous rocks and processes: a practical guide**. John Wiley & Sons, 2011.

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

HOU, Z.; TIAN, S.; YUAN, Z.; XIE, Y.; YIN, S.; YI, L.; FEI, H.; YANG, Z. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 244, n. 1-2, p. 234-250, 2006.

JACOMO, J. C. P. Os hidrocarbonetos não convencionais: uma análise da exploração do gás de folhelho na Argentina à Luz da Experiência Norte-Americana. **Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE**, 2014.

JERRAM, D. A.; DOBSON, K. J.; MORGAN, D. J.; PANKHURST, M. J. The petrogenesis of magmatic systems: Using igneous textures to understand magmatic processes. In: **Volcanic and Igneous Plumbing Systems – Understanding Magma Transport, Storage and Evolution in the Earth's Crust**. Elsevier, p. 191-229, 2018.

JERRAM, D. A.; MILLETT, J. M.; KÜCK, J.; THOMAS, D.; PLANKE, S.; HASKINS, E.; PIERDOMINICI, S. Understanding volcanic facies in the subsurface: a combined core, wireline logging and image log data set from the PTA2 and KMA1 boreholes, Big Island, Hawaii. **Scientific Drilling**, v. 25, p. 15-33, 2019.

KERR, A. C. Oceanic plateaus. **Treatise on geochemistry**, v. 4, p. 631-667, 2014.

LE MAITRE, R. W. (Ed.); STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B.; LE BAS, M. J.; BONIN, B.; BATEMAN, P. **Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks**. Cambridge University Press, 2005.

LENHARDT, N.; GOTZ, A. E. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analog study on the Miocene Tepoztlan formation, Central Mexico. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 204, p. 66-75, 2011.

LEVORSEN, A. I.; BERRY, F. A. F. **Geology of petroleum**. San Francisco: WH Freeman, 1967.

MAGEE, C.; BASTOW, I.; HETHERINGTON, R.; DE VRIES, B. W.; JACKSON, C. Sill emplacement and corresponding ground deformation processes at the Alu-Dalafilla volcanic centre in the Danakil Depression, Ethiopia. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 18)**, 2016.

MAGOON, L. B.; DOW, W. G. The Petroleum System. In: **The Petroleum System, From Source to Trap (AAPG Memoir 60)**, Tulsa, Oklahoma. p. 3-24, 1994.

MARK, N. J.; SCHOFIELD, N.; PUGLIESE, S.; WATSON, D.; HOLFORD, S.; MUIRHEAD, D.; HEALY, D. Igneous intrusions in the Faroe Shetland basin and their implications for hydrocarbon exploration; new insights from well and seismic data. **Marine and Petroleum Geology**, v. 92, p. 733-753, 2018.

MARQUES, L. S.; ULBRICH, M. N.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C. G. Petrology, geochemistry and Sr–Nd isotopes of the Trindade and Martin Vaz volcanic rocks (southern Atlantic Ocean). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 93, n. 3-4, p. 191-216, 1999.

MCPHIE, J.; DOYLE, M.; ALLEN, R. **Volcanic Textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks**. Hobart, University of Tasmania, 1993.

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

MILANI, E. J.; BRANDÃO, J. A. S. L.; ZALÁN, P. V.; GAMBOA, L. A. P. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, n. 3, p. 352-396, 2000.

MILLETT, J.; JERRAM, D.; PLANKE S.; HEALY D.; THOMAS D.; PIERDOMINICI S.; ROSSETTI L.; KUCK J. The Petrophysical Properties of Lava Flow Reservoirs. European Association of Geoscientists & Engineers. **Conference Proceedings, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition**, v. 2020, p. 1-5, 2020.

MINSTER J. B.; JORDAN, T. H.; MOLNAR, P.; HAINES, E. Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. **Geophysical Journal International**, v. 36, p. 541- 576, 1974.

MIRANDA, F. S.; VETTORAZZI, A. L.; CUNHA, P. R. C.; ARAGÃO, F. B.; MICHELON, D.; CALDEIRA, J. L.; PORSCHE, E.; MARTINS, C.; RIBEIRO, R. B.; VILELA, A. F.; CORRÊA, J. R.; SILVEIRA, L. S.; ANDREOLA, K. Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores. **Geological Society of London, Special Publications**, v. 472, n. 1, p. 341-360, 2018.

MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, v. 3, p. 87 e 165, 2003.

MORGAN, W. J. Convection plumes in the lower mantle. **Nature**, v. 230, n. 5288, p. 42-43, 1971.

NELSON, S. T.; MONTANA, A. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. **American Mineralogist**, v. 77, n. 11-12, p. 1242-1249, 1992.

PASQUALON, N. G.; LIMA, E. F.; SCHERER, C. M. S.; ROSSETTI, L. M. M.; LUZ, F. R. Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão Volcano, Trindade Island, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 380, p. 48-63, 2019.

PIRES, G. L. C.; BONGIOLO, E. M.; GERALDES, M. C.; RENAC, C.; SANTOS, A. C.; JOURDAN, F.; NEUMANN, R. New 40 Ar/39 Ar ages and revised 40 K/40 Ar* data from nephelinitic–phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 327, p. 531-538, 2016.

PIRES, G. L. C.; BONGIOLO, E. M. The nephelinitic–phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 72, p. 49-62, 2016.

PLANKE, S.; RASMUSSEN, T.; REY, S. S.; MYKLEBUST, R. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. In: **Geological Society of London, Petroleum Geology Conference series**, v. 6, n. 1, p. 833-844, 2005.

ROCK, N. M. S. The nature and origin of lamprophyres: an overview. **Geological Society of London, Special Publications**, v. 30, n. 1, p. 191-226, 1987.

ROSSETTI, L. M. M.; HEALY, D.; HOLE, M. J.; MILLETT, J. M.; LIMA, E. F.; JERRAM, D. A.; ROSSETTI, M. M. M. Evaluating petrophysical properties of volcano-sedimentary sequences: A case study in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. **Marine and Petroleum Geology**, v. 102, p. 638-656, 2019.

RYABCHIKOV, I. D.; KOGARKO, L. N. Redox equilibria in alkaline lavas from Trindade island, Brazil. **International Geology Review**, v. 36, n. 5, p. 473-483, 1994.

SCHOLLE, P. A. **A color illustrated guide to constituents, textures, cements, and porosities of sandstones and associated rocks**. AAPG Memoir 28. AAPG, 1979.

SCHOLLE, P. A.; ULMER-SCHOLLE, D. S. **A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis**, AAPG Memoir 77. AAPG, 2003.

SCHUTTER, S. R. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. **Geological Society of London, Special Publications**, v. 214, n. 1, p. 7-33, 2003.

SIEBEL, W.; BECCHIO, R.; VOLKER, F.; HANSEN, M. A. F.; VIRAMONTE, J.; TRUMBELL, R. B.; HAASE, G.; ZIMMER, M. Trindade and Martin Vaz Islands, South Atlantic: isotopic (Sr, Nd, Pb) and trace elements constraints on plume related magmatism. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 13, p. 79-103, 2000.

SIGURDSSON, H.; HOUGHTON, B.; MCNUTT, S.; RYMER, H.; & STIX, J. (Eds.). **The encyclopedia of volcanoes**. Elsevier, 2015.

SRUOGA, P.; RUBINSTEIN, N.; HINTERWIMMER, G. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 132, n. 1, p. 31-43, 2004.

SRUOGA, P.; RUBINSTEIN, N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. **AAPG Bulletin**, v. 91, n. 1, p. 115-129, 2007.

STRECKEISEN, A. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilitite Rocks. Recommendations and Suggestions. Neues Jahrbuch für Mineralogie. Stuttgart. **Abhandlungen**, v. 143, p. 1-14, 1978.

THOMAZ FILHO, A.; DE CESERO, P.; MIZUSAKI, A. M.; LEÃO, J. G. Hot spot volcanic tracks and their implications for south American plate motion, Campos basin (Rio de Janeiro state), Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 18, n. 3-4, p. 383-389, 2005.

THOMAZ-FILHO, A.; MIZUSAKI, A. M. P.; ANTONIOLI, L. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n.2, p. 128-137, 2008.

THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J. C. Migrating Cretaceous–Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume?. **Journal of Petrology**, v. 39, n. 8, p. 1493-1526, 1998.

TSUCHIYAMA, A. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. **Contributions to mineralogy and petrology**, v. 89, n. 1, p. 1-16, 1985.

ULBRICH, H. H. G. J.; GOMES, C. B. Alkaline rocks from continental Brazil. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 135-154, 1981.

ULBRICH, M. N. C.; MARQUES, L. S.; LOPES, R. P. As ilhas vulcânicas brasileiras: Fernando de Noronha e Trindade. In: **Geologia do continente sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, Editora Becca, p. 554-571, 2004.

VIEIRA, L. D.; MOREIRA, A. C.; MANTOVANI, I. F.; HONORATO, A. R.; PRADO, O. F.; BECKER, M.; FERNANDES, C. P.; WAICHEL, B. L. The influence of secondary processes on the porosity of volcanic rocks: A multiscale analysis using 3D X-ray microtomography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 172, p. 109657, 2021.

WANG, P.; CHEN, S. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China Volcanic Reservoirs and Their Exploration. **AAPG Bulletin**, v. 99, n. 3, p. 499-523, 2015.

WANG, P.; CHEN C.; ZHANG, Y.; GAO, Y.; QU, X.; YI, J. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin. **Natural Gas Industry**, v. 2, p. 440-448, 2015.

WILSON, J. T. A possible origin of the Hawaiian Islands. **Canadian Journal of Physics**, v. 41, n. 6, p. 863-870, 1963.

WILSON, J. A new class of faults and their bearing on continental drift. **Nature**, v. 207, n. 4995, p. 343-347, 1965.

ZELLMER, Georg F. Gaining acuity on crystal terminology in volcanic rocks. **Bulletin of Volcanology**, v. 83, n. 11, p. 1-8, 2021.