

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE PALEONTOLOGIA E ESTRATIGRAFIA**

**EDUARDO AGUIAR DE MELLO**

**FEIÇÕES DE INTERAÇÃO VULCANO-SEDIMENTARES E SUA IMPORTÂNCIA  
EM SISTEMAS PETROLÍFEROS – UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DA  
DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**PORTO ALEGRE**

**2023**

**EDUARDO AGUIAR DE MELLO**

**FEIÇÕES DE INTERAÇÃO VULCANO-SEDIMENTARES E SUA IMPORTÂNCIA  
EM SISTEMAS PETROLÍFEROS – UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DA  
DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de conclusão do curso de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia como requisito parcial para obtenção do título de bacharelado em Geologia.

**Orientadores:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Pimentel Mizusaki (UFRGS) e Prof. Dr. Giovanni Matte Cioccarri (UFPel).

**PORTO ALEGRE**

**2023**

### CIP - Catalogação na Publicação

de Mello, Eduardo Aguiar  
FEIÇÕES DE INTERAÇÃO VULCANO-SEDIMENTARES E SUA  
IMPORTÂNCIA EM SISTEMAS PETROLÍFEROS - UM ESTUDO DE  
CASO NA REGIÃO DA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO  
SUL / Eduardo Aguiar de Mello. -- 2023.  
50 f.  
Orientadora: Ana Maria Pimentel Mizusaki.

Coorientador: Giovani Matte Cioccarì.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,  
BR-RS, 2023.

1. Sistemas petrolíferos. 2. Intertraps. 3. Modelos  
análogos. 4. Bacia do Paraná. 5. Geologia do petróleo.  
I. Mizusaki, Ana Maria Pimentel, orient. II.  
Cioccarì, Giovani Matte, coorient. III. Título.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Geociências  
Departamento de Paleontologia e Estratigrafia  
Curso de Graduação em Geologia

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “FEIÇÕES DE INTERAÇÃO VULCANO-SEDIMENTARES E SUA IMPORTÂNCIA EM SISTEMAS PETROLÍFEROS – UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL” elaborado por EDUARDO AGUIAR DE MELLO como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

---

Profa. Dra. Lauren da Cunha Duarte (UFRGS)

---

Profa. Dra. Amanda Goulart Rodrigues (UFRGS)

---

Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza (UNIPAMPA)

Porto Alegre, abril de 2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Marcos e Odete, pelo apoio e presença na minha vida sempre, desde o momento de escolha do curso até o presente momento em que escrevo este trabalho, assim como a minha irmã, Carolina, por me aguentar morando com ela nesse último ano e me aconselhar nos momentos de crise. Nada disso seria possível sem vocês.

À minha orientadora, Ana Maria Pimentel Mizusaki, por acreditar nas minhas ideias e tornar possível a realização do trabalho. Foram muitas conversas construtivas ao longo dos últimos anos como bolsista. Ao meu co-orientador Giovani Matte Ciocari, pelas discussões, ideias propostas e revisões precisas no meu trabalho, assim como por toda a parceria desde quando começamos o artigo de revisão.

Aos meus amigos geológicos, em especial Bruno Angonese, João Vargas, Thaís Schafer, Bruna Aguiar, Thaianie Niederauer e Pedro Costabile, pessoas que a geologia me trouxe e que fizeram eu pensar sobre o mundo ao nosso redor de novas maneiras, amo vocês.

Aos meus amigos da vida, em especial Eduardo Grespan, Rariel Tedesco, Felipe Aiub e Pedro Alves. O tempo passa e os amigos verdadeiros ficam, obrigado pela nossa amizade, pelo apoio nas situações adversas e pelos alívios cômicos (tão comuns!) no meu dia a dia estressante.

À minha terapeuta Sônia, por exercer sua profissão com maestria, dando ouvidos à mim nas difíceis situações que vivi ao longo do último ano. Tudo foi necessário e engrandecedor na minha vida.

E finalmente, aos professores que tive ao longo da minha vida, desde o ensino fundamental até o ensino superior, acredito no poder transformador da educação graças ao que muitos de vocês me permitiram aprender e vivenciar.

*“...e onde não existe amor não existe razão.” (Fiódor Dostoiévski em Notas do Subsolo)*

## RESUMO

As interações lava-sedimento estão cada vez mais bem documentadas na literatura e existem modelos descritivos dos aspectos do magma/lava na formação das diferentes litologias e feições. No entanto, o entendimento destes processos e as rochas resultantes ainda são discutíveis do ponto de vista da sua influência em sistemas petrolíferos. Neste trabalho objetivou-se estudar a interação de rochas vulcânicas com rochas sedimentares, visando identificar a natureza do contato lava-sedimento em diferentes pontos da porção sudeste atual da Bacia do Paraná e investigar a relação entre as rochas sedimentares e as rochas vulcânicas de forma que o estudo permita analogias a situações geológicas semelhantes. As rochas ígneas básicas da Formação Serra Geral e os arenitos eólicos da Formação Botucatu, na Bacia do Paraná registram feições de interação vulcano-sedimentar bem preservadas no seu limite, assim como grandes extensões onde podemos encontrar essas feições, portanto foram escolhidas como objeto de estudo deste trabalho. A interação vulcano-sedimentar gera uma variedade de feições características, tais como: peperitos ou brechas vulcanoclásticas, *intertraps* arenosos e feições de superfície, como paleodunas recobertas marcadas por estruturas estriadas, geodos e fraturas preenchidas por sedimentos. Há necessidade de entendimento não só dos modelos da distribuição destas litologias e feições, mas também de seu sistema permo-poroso, não convencional. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica focada na compreensão da interação vulcano-sedimentar e quais seriam as rochas e feições encontradas nesses ambientes. Posteriormente, foram definidas áreas potenciais para análise dessa interação na Bacia do Paraná através da avaliação de imagens e materiais prévios. Em seguida foi realizado trabalho de campo para caracterização das rochas e feições encontradas na interface de interação vulcano-sedimentar, através da coleta de amostras para descrição e análises petrográficas, assim como levantamento de perfis colunares-estratigráficos. Através da integração dos dados de campo e análises petrográficas se concluiu que a interação vulcano-sedimentar pode ter um papel importante em sistemas petrolíferos pela intensa silicificação encontrada em feições dos *intertraps* arenosos, como fraturas preenchidas por arenitos, ou no próprio arenito próximo ao contato com o basalto. Essa silicificação por processos posteriores obliterou por completo a porosidade nos arenitos, abrindo a possibilidade deles atuarem como rochas-selantes.

**Palavras-Chave:** sistemas petrolíferos, *intertraps*, modelos análogos, Bacia do Paraná, geologia do petróleo

## ABSTRACT

Lava-sediment interactions are increasingly well documented in the literature and there are descriptive models of the aspects of magma/lava in the formation of different lithologies and features. However, the understanding of these processes and the resulting rocks are still debatable from the point of view of their influence on petroleum systems. The objective of this work is to study the interaction of volcanic rocks with sedimentary rocks, in order to identify the nature of the lava-sediment contact at different points in the southeastern portion of the Paraná Basin and to investigate the relationship between volcanoclastic and volcanic rocks in a way that allows analogies to similar geological situations. The basic igneous rocks of the Serra Geral Formation and the eolic sandstones of the Botucatu Formation, in the Paraná Basin, register well preserved features of volcano-sedimentary interaction at their limits, and their occurrence can be found in large extensions as well, thus they were chosen as the study object of this work. Volcano-sedimentary interaction generates a variety of characteristic features, such as peperites or volcanoclastic breccias, sandy intertraps, and surface features such as overlying paleodunes marked by striated structures, geodes, and sediment-filled fractures. There is a need to understand not only the models of the distribution of these lithologies and features, but also their permo-porous, unconventional system. Initially, a literature review was carried out focused on understanding the volcano-sedimentary interaction and which rocks and features would be found in these environments. Subsequently, potential areas for the analysis of this interaction in the Paraná Basin were defined through the evaluation of images and previous materials. Field work was then carried out to characterize the rocks and features found at the volcano-sedimentary interaction interface, by collecting samples for description and petrographic analysis, as well as columnar-stratigraphic profiles. Through the integration of field data, petrographic analysis and data from previous projects it was concluded that volcano-sedimentary interaction can play an important role in petroleum systems due to the intense silicification found in features like sandstone filled fractures or the sandstone near the contact with basalt. This silicification by posterior processes obliterated the porosity in sandstones, what gives them the possibility to act as sealing rocks.

Keywords: petroleum systems, intertraps, analogous models, Paraná Basin, petroleum geology

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização das áreas de estudo no contexto dos grandes domínios geomorfológicos do estado do Rio Grande do Sul (Modificado de Sordi, 2021).....	3
Figura 2: Localização da Bacia do Paraná no contexto regional da América do Sul. (Modificado de Rios et al., 2018).....	5
Figura 3: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná proposta por Milani (2007) com destaque no quadro em vermelho para a Supersequência Gondwana III, onde se situam as Formações Botucatu (BOT) e Serra Geral (SGL), unidades de interesse do trabalho (Modificado de Milani, 2007).....	7
Tabela 1: Síntese das ocorrências de feições de interação vulcano-sedimentares registradas na Bacia do Paraná.).....	10
Figura 4: A) Feição de paleoduna preservada documentada por Rios et al. (2018) em Novo Hamburgo (RS).....	11
Figura 5: Modelo esquemático do desenvolvimento de unidades genéticas eólicas. A disponibilidade alta de areia associada a uma grande bacia permitiu a acumulação de dunas na unidade genética inferior (A). A interrupção da deposição dessa unidade foi consequência da velocidade e abundância dos derrames basálticos da FSG (B). O recobrimento das unidades genéticas inferiores diminuiu a disponibilidade de sedimentos, restringindo a deposição das unidades genéticas superiores a pequenas dunas crescentes e lençóis de areia (B–D) (Traduzido de Scherer, 2002).....	12
Figura 6: Fluxograma demonstrando a metodologia aplicada no trabalho.....	17
Figura 7: Localização dos perfis levantados, unidade de medida dos perfis em metro.....	21
Figura 8: A) Amostra de mão coletada no setor sem vesículas do derrame. B) Detalhe evidenciando a textura fina.....	22

Figura 9: A) Amostra de mão coletada no setor vesicular do derrame (topo). B) Zoom na amostra evidenciando as amígdalas preenchidas principalmente por zeolitas.....23

Figura 10: A) Amostra de mão de arenito Botucatu silicificado coletada na Pedreira Incopel, Ivoti (RS), perfil 3. B) Zoom na amostra demonstrando o aspecto maciço do arenito silicificado, mas preservando características como sua bimodalidade.....24

Figura 11: A) Derrame basáltico sobre uma lente preservada de arenito, perfil 1, município de Santa Cruz do Sul (RS); B) detalhe destacando a superfície de contato reta; C) arenito quartzo-feldspático com estratificação de baixo ângulo; D) fotomicrografia exibindo o arredondamento dos grãos de quartzo e feldspato e a cimentação carbonática, nicóis cruzados.....25

Figura 12: A) Fraturas preenchidas por arenito na porção superior do basalto em contato com o *intertrap*, perfil 2, município de Ivoti (RS); B) fotomicrografia do contato entre o dique de arenito e o basalto evidenciando a cimentação por calcedônia no arenito, a nicóis cruzados; C) fotomicrografia do contato entre o arenito e o basalto a nicóis descruzados, destaque para as bordas de oxidação nos grãos de quartzo, também observadas em lupa.....26

Figura 13: A) Amostra de mão de fratura preenchida por arenito coletada em Ivoti (RS), perfil 2. B) Detalhe na amostra demonstrando a silicificação no arenito e um pequena borda de reação milimétrica.....27

Figura 14: A) Contato irregular entre porção de topo de derrame com *intertrap* arenoso, afloramento TCCE-12, perfil 2. B) Detalhe de amostra coletada do arenito *intertrap*. C) Fotomicrografia destacando a cimentação por calcedônia, nicóis cruzados.....28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**BOT** - Formação Botucatu

**cm** - centímetros

**Fm.** - formação

**FSG** - Formação Serra Geral

**km** - quilômetros

**m** - metros

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Localização da área de estudo.....	2
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Objetivos.....	4
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1 Bacia do Paraná.....	5
2.1.1 <i>Formação Serra Geral</i> .....	7
2.1.2 <i>Formação Botucatu</i> .....	8
2.2 Interação vulcano-sedimentar na Bacia do Paraná.....	9
2.3 Produtos da interação lava-sedimento em sistemas petrolíferos.....	13
2.3.1 <i>Rochas vulcânicas em sistemas petrolíferos</i> .....	13
2.4 A importância da elaboração de modelos análogos.....	15
<b>3. MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
3.1 Etapa pré-campo.....	18
3.2 Trabalho de campo.....	18
3.3 Petrografia.....	19
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>20</b>
4.1 Trabalho de campo.....	20
4.1.1 <i>Perfis Colunares</i> .....	22
4.2 Descrições gerais.....	22
4.2.1 <i>Rochas vulcânicas</i> .....	22
4.2.2 <i>Rochas sedimentares</i> .....	23
4.2.3 <i>Interações vulcano-sedimentares</i> .....	24
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	
<b>ANEXOS</b>	



## 1. INTRODUÇÃO

Um sistema petrolífero ativo compreende a existência e o funcionamento síncronos de quatro elementos essenciais: rochas geradoras maduras, rochas-reservatório, rochas selantes e *traps*. Estes devem estar integrados a processos também essenciais, sendo eles geração, migração e acumulação de petróleo, segundo Magoon & Dow (1994).

Sistemas petrolíferos pressupõem a presença de rochas reservatórios. Os reservatórios tradicionais e de melhor qualidade, em geral, são os arenitos e os carbonatos, sendo denominados de convencionais. Isto porque essas rochas geralmente apresentam uma combinação de valores de porosidade e permeabilidade que possibilitam a acumulação de óleo e/ou gás.

No entanto, existem os sistemas petrolíferos não convencionais, onde o sistema permo-poroso é diferenciado. No contexto atual, estes são cada vez mais importantes e dentre eles, destacam-se as rochas vulcânicas (Sruoga & Rubinstein, 2007; Farooqui et al., 2009; Descovi et al., 2021). Têm sido discutidos e apresentados modelos análogos para os reservatórios não convencionais - vulcânicos destacando-se a Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) (Reis et al., 2014).

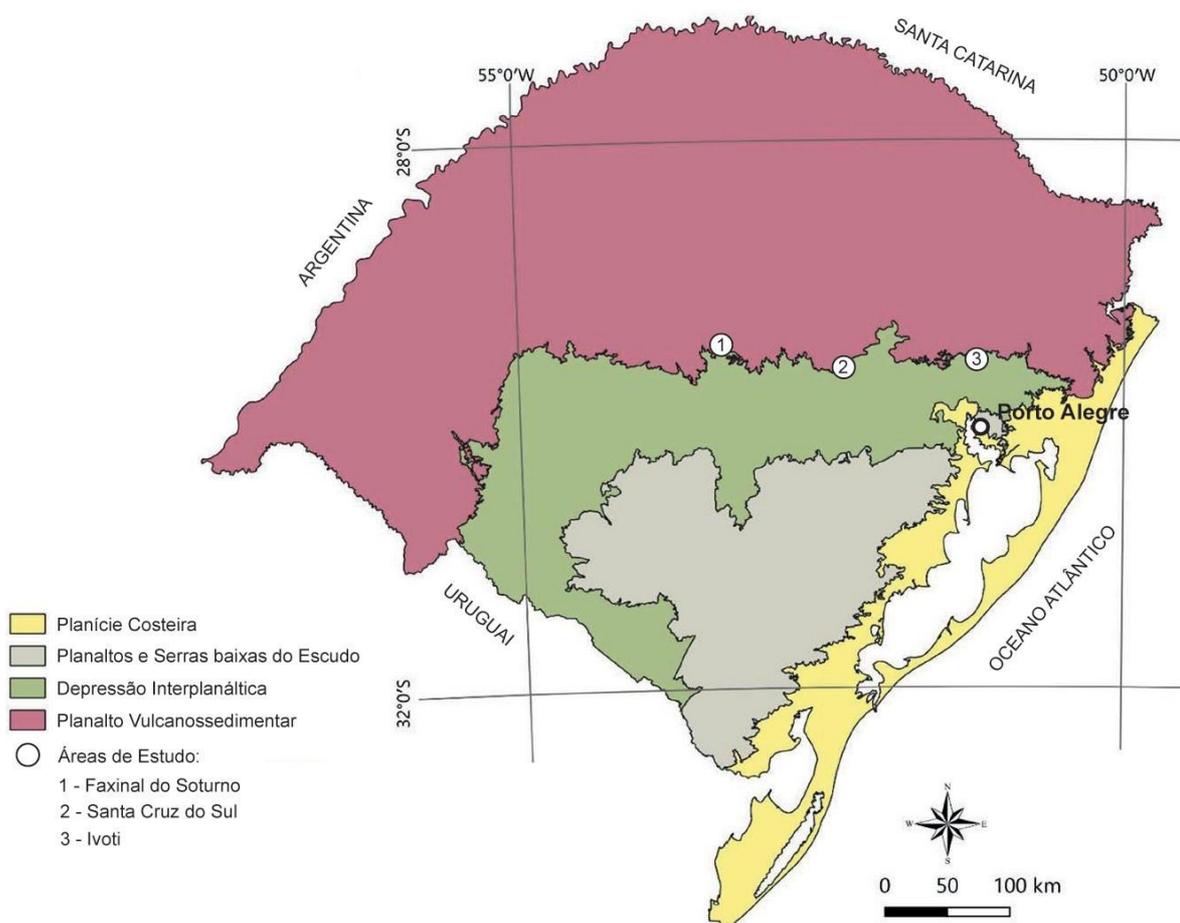
Porém, nos modelos análogos e nas situações de reconstrução de eventos vulcânicos como reservatórios observa-se a presença de rochas sedimentares associadas, especialmente camadas de arenitos quartzosos que, na Bacia do Paraná, são denominados de *intertraps* (Reis et al., 2014; Rios et al., 2018). Nesta situação podem ser formadas interações entre as lavas e os sedimentos originando as rochas vulcanoclásticas (brechas, autobrechas entre outras) e epiclásticas. Feições secundárias como fraturas preenchidas por sedimentos também podem ser formadas.

As interações lava-sedimento têm sido documentadas na literatura (Jerram et al., 1999, 2000; Jerram & Stollhofen, 2002; Scherer, 2002, 2004; Waichel et al., 2007, 2008; Holz et al., 2008; Rios et al., 2018; De Souza et al., 2022) com a proposição de modelos de formação das diferentes litologias e feições resultantes dessa interação. No entanto, o entendimento da influência destes produtos em sistemas petrolíferos ainda é pouco conhecido. Há necessidade da compreensão não só dos modelos de

formação e distribuição destas litologias mas também de qual seria o papel das interações vulcano-sedimentares num contexto de reservatório. Neste estudo foram analisadas as interações vulcano-sedimentares observadas na borda sudeste atual da Bacia do Paraná com o intuito de entender sua influência em possíveis situações associadas a rochas-reservatório ou rochas-selantes que possuam essa interação.

## 1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho abrange regiões dos municípios de Faxinal do Soturno, Santa Cruz do Sul e Ivoti, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), localizados na borda sudeste atual da Bacia do Paraná. É um setor onde afloram as rochas ígneas da Formação Serra Geral, as rochas sedimentares da Formação Botucatu e suas interações.



**Figura 1** - Mapa de localização das áreas de estudo no contexto dos grandes domínios geomorfológicos do estado do Rio Grande do Sul (Modificado de Sordi, 2021).

No contexto de domínios geomorfológicos onde estão inseridos, os afloramentos dessas interações vulcano-sedimentares são encontrados principalmente na transição da depressão interplanáltica para o planalto vulcanossedimentar, região denominada geograficamente Depressão Central do Rio Grande do Sul.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os reservatórios vulcânicos são complexos e geralmente descritos como não-convencionais. Seu sistema permo-poroso é principalmente condicionado por fraturas e microfraturas e as rochas epiclásticas eventualmente associadas também podem ter as mesmas condicionantes para permeabilidade e porosidade. A interação de

rochas vulcânicas e sedimentares origina rochas vulcanoclásticas e outros tipos de feições que pelas suas características podem ter papel fundamental em reservatórios associados a este tipo de ocorrência.

Este contexto estimula a realização de estudos que busquem entender os possíveis efeitos dessa interação em sistemas petrolíferos. A sedimentação da Formação Botucatu ocorreu concomitantemente com os primeiros derrames da Formação Serra Geral e devido à grande extensão e volume desta manifestação magmática, as interações lava-sedimento ocorrem com frequência, em diferentes pontos da bacia (Rios et al., 2018). A frequência dessas ocorrências em afloramentos acessíveis permite a coleta de material em diferentes pontos da bacia.

### 1.3 OBJETIVOS

Verificar o papel e a importância dos produtos da interação vulcano-sedimentar em sistemas petrolíferos como elementos que poderiam ser considerados reservatórios ou selantes.

Objetivos específicos:

- Identificar a natureza do contato lava-sedimento em diferentes pontos da porção sudeste atual da Bacia do Paraná;
- Investigar a relação entre as rochas vulcanoclásticas e as rochas vulcânicas de forma que permita analogias a situações semelhantes encontradas em subsuperfície no depocentro da bacia.

## 2. ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

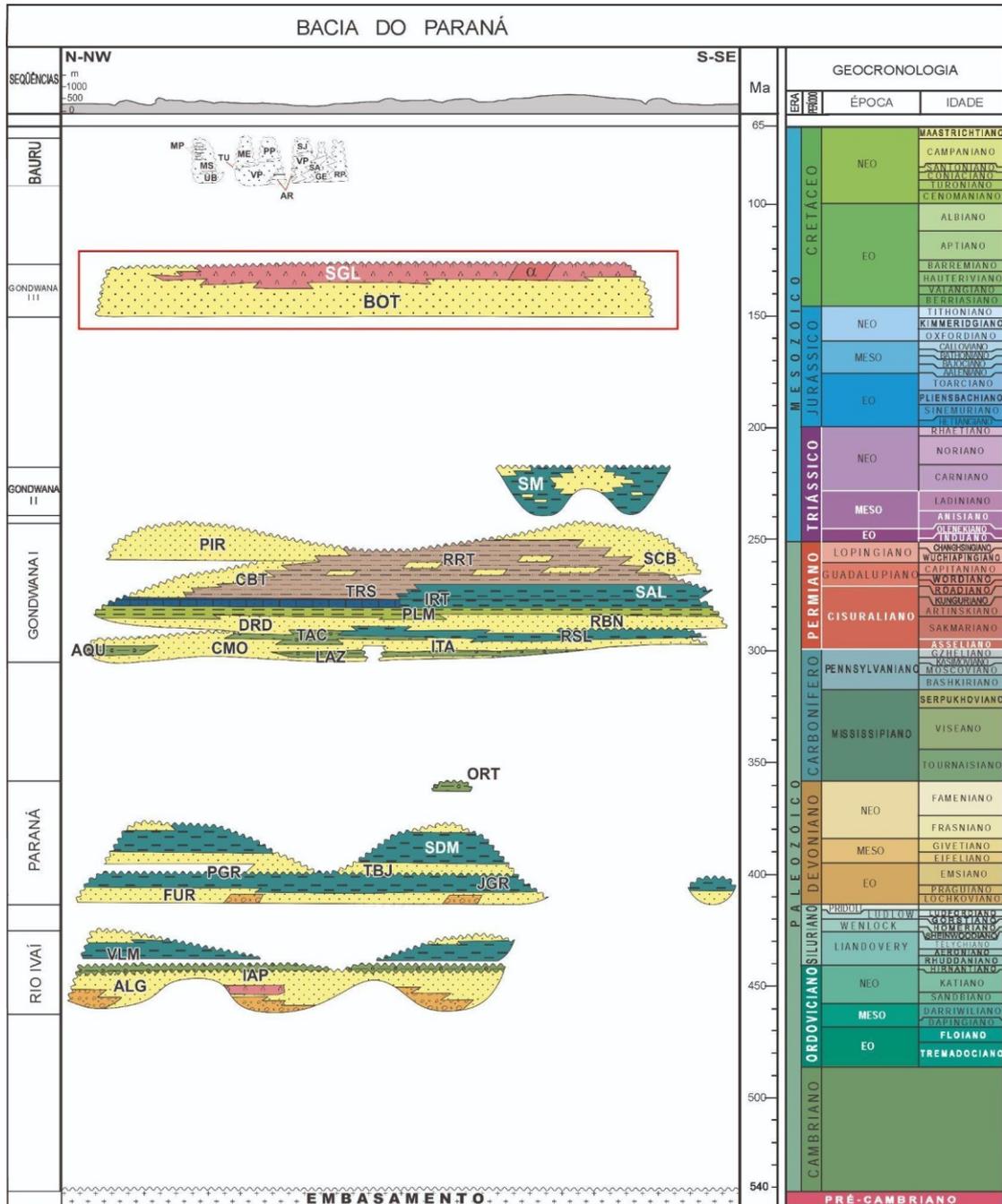
### 2.1 BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná (Figura 2) é uma vasta bacia intraplaca sul-americana que abrange uma área de cerca de 1.700.000 km<sup>2</sup> na Plataforma Sul-Americana, estendendo-se pelo Brasil e países adjacentes, Paraguai, Uruguai e Argentina (Schneider et al., 1974; Milani et al., 2007; Holz et al., 2010). A bacia é preenchida por aproximadamente 7.000 m de sedimentação vulcano-sedimentar no seu depocentro, com idades variando do Ordoviciano ao Cretáceo (Zalán et al., 1990, 1991).



**Figura 2** - Localização da Bacia do Paraná no contexto regional da América do Sul. (Modificado de Rios et al., 2018).

Milani (1997) reconheceu no registro vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná, seis unidades estratigráficas de ampla escala ou supersequências. São pacotes rochosos limitados por superfícies de discordância de caráter inter-regional. As supersequências Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano) e Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico) definem ciclos transgressivos-regressivos do mar paleozoico, enquanto as supersequências posteriores Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico a Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) possuem feições continentais associadas a magmatismo básico (Milani et al., 2007). As unidades de interesse neste estudo compõem a Supersequência Gondwana III são descritas a seguir e estão destacadas na figura 3.



**Figura 3** - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná proposta por Milani (2007) com destaque no quadro em vermelho para a Supersequência Gondwana III, onde se situam as Formações Botucatu (BOT) e Serra Geral (SGL), unidades de interesse do trabalho (Modificado de Milani, 2007).

### 2.1.1 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral (SGL) é uma unidade vulcânica, composta predominantemente por derrames de natureza básica e subordinadamente por rochas ácidas, além de rochas vulcanoclásticas e epiclásticas.

Estratigraficamente, essa unidade geológica está inserida no Grupo São Bento. A SGL abrange rochas que refletem o vulcanismo fissural, datado do Cretáceo Inferior, resultante da distensão, rifteamento e ruptura do supercontinente Gondwana (Zalán et al., 1990; Polo, 2014).

Os derrames de lavas basálticas e secundariamente intrusões associadas na sequência sedimentar caracterizam uma das maiores manifestações vulcânicas episódicas de caráter básico do Neocomiano. Registra-se uma espessura total de até 2.000 m de rochas vulcânicas que encontram-se em contato concordante e abrupto com os arenitos eólicos subjacentes da Formação Botucatu. Predominam basaltos de afinidade toleítica (90%), seguido por andesitos toleíticos (7%) e em menores proporções riolitos-riodacitos (3%) especialmente nas porções mais superiores da sequência (Piccirillo et al., 1988; Piccirillo & Melfi, 1988). Esses grandes derrames, em interação com sequências sedimentares intercaladas, são objeto de interesse do trabalho para análise de possíveis reservatórios de hidrocarbonetos, tendo em vista o potencial dessa interação na geração de condições permoporosas para retenção de fluidos.

### 2.1.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu compreende uma extensa área acima de 1.600.000 km<sup>2</sup>, possuindo pacotes de 80 a 400 m conforme Milani (1997). A parte basal desta Formação é discordante com a Formação Rio do Rastro (Fig. 3) e o contato superior é concordante e, por vezes, se interdigita com os derrames da Formação Serra Geral. A Formação Botucatu nas suas fácies eólicas é considerada como um imenso depósito de dunas residuais com estratos cruzados de grande porte (até 30 m). São arenitos quartzosos de coloração rosada, granulometria fina a média, grãos arredondados de aspecto fosco, alta esfericidade e estratificação cruzada acanalada, de médio a grande porte (1-30m) caracterizando o transporte eólico. A espessura dessas dunas pode chegar a 100 m de espessura, mas pode ser bastante variável e apresentar preservação do paleo-relevo de dunas (Scherer, 1998, 2000, 2002). Localmente, ocorrem interdunas secas e interdunas úmidas (Almeida 1986; Scherer, 1998, 2000, 2002).

## 2.2 INTERAÇÃO VULCANO-SEDIMENTAR NA BACIA DO PARANÁ

Durante o extravasamento de lavas que constituem hoje a Formação Serra Geral, ocorreu o recobrimento de dunas eólicas com sedimentação ainda ativa associadas à Formação Botucatu. É comum a interação sedimento-lava na porção inferior dos derrames, que vem sendo documentada por diferentes autores nos últimos anos em estudos na Bacia do Paraná (Jerram et al., 1999, 2000; Scherer, 2000, 2002; Waichel et al., 2007; Holz et al., 2008; Rios et al., 2018; De Souza et al., 2022). Nesta porção, são marcantes as feições de interação vulcano-sedimentares, que neste caso, devido à grande extensão e volume da manifestação magmática associada, ocorrem com frequência em diferentes pontos da bacia (Rios et al., 2018).

A interação vulcano-sedimentar gera uma variedade de feições características, tais como: peperitos (brechas vulcanoclásticas), diques de arenito, paleodunas preservadas, geodos e fraturas preenchidas por sedimentos (Tabela 1).

Nomenclatura	Gênese	Características	Composição	Detalhes	Referências
Diques de arenito	Interação da sedimentação ativa com lava ainda em processo de cristalização	Arenitos ramificados na base do derrame, que diminuem a largura em direção ao topo do derrame	Arenito com quartzo, feldspato e fragmentos líticos da rocha sotoposta (vulcânica)	Localizados na base do derrame	Petry et al., 2007; Michelin, 2014; Rios et al., 2018; De Souza et al., 2022
Paleodunas preservadas	Primeiros derrames cobrindo dunas, sem interação	Preservação da estrutura da duna	Arenito quartzoso com feldspato, recoberto por rochas vulcânicas ácidas ou básicas	Melhor preservação quando associadas aos primeiros derrames da FSG	Scherer, 2002; Waichel et al., 2008; Holz et al., 2008; Rios et al., 2018
Faturas com arenitos	Faturas de rochas ígneas preenchidas por arenitos	Arenitos formados após cristalização do derrame situados na zona de interação do topo do derrame	Arenito com quartzo, feldspato e fragmentos líticos da rocha sobreposta (vulcânica)	Localizadas no topo do derrame	Petry et al., 2007; Michelin, 2014; Rios et al., 2018
Geodos com sedimentos	Vesículas preenchidas por material sedimentar	Geodos centimétricos com clastos sedimentares silicificados	Clastos de siltito argiloso	Localizados no meio e topo do derrame	Michelin, 2014; Rios et al., 2018
Peperitos ou brechas vulcanoclásticas	Derrame magmático recobrindo sedimentos com sedimentação ainda ativa	Rochas mistas de material vulcânico e sedimentar presentes em diferentes zonas de interação	Clastos de rochas vulcânicas ácidas ou básicas em matriz sedimentar de quartzo e feldspato	Localizadas generalizadamente no contato entre unidades sedimentares e ígneas	Scherer, 2000; Waichel et al., 2007, 2008; Petry et al., 2007; Rios et al., 2018; De Souza et al., 2022

**Tabela 1** - Síntese das ocorrências de feições de interação vulcano-sedimentares registradas na Bacia do Paraná.

Peperitos ou brechas vulcanoclásticas – Esses produtos de interação ocorrem comumente em diferentes zonas de interação vulcano-sedimentar na Bacia do Paraná (Scherer, 2000; Waichel et al., 2007, 2008; Petry et al., 2007; Rios et al., 2018; De Souza et al., 2022). São rochas compostas por clastos angulosos de basalto ou dacito em matriz sedimentar ou argilosa. Os clastos caracterizam-se por apresentarem composições e texturas semelhantes indicando associação com um único derrame. As brechas posicionam-se na base dos derrames junto ao contato com o *intertrap* (Rios, 2018).

Diques de arenito – Arenitos silicificados que estão presentes nas porções de base de derrames, diminuindo sua largura em direção ao topo são descritos por múltiplos autores (Petry et al., 2007; Michelin, 2014; Rios et al., 2018; De Souza et al.,

2022). Normalmente está situado ao longo de fraturas da rocha vulcânica e apresenta bordas de reação com a rocha encaixante.

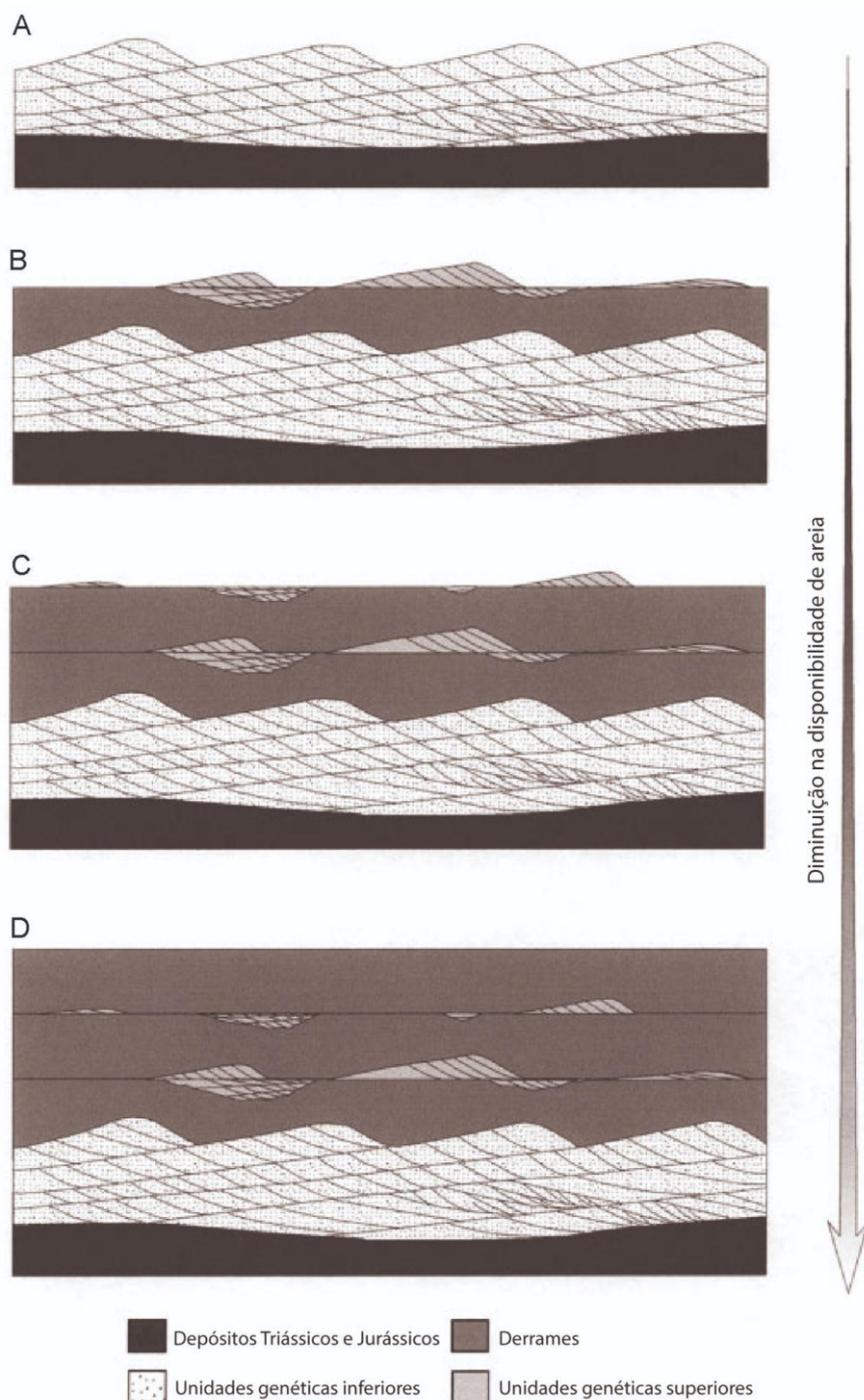
Paleodunas Preservadas – Estas feições apresentam preservação significativa da paleodunas do antigo deserto Botucatu (Figura 4) e foram relatadas por múltiplos autores (Scherer, 2002; Waichel et al., 2008; Rios, 2018). Caracterizam-se pela preservação de estruturas características do transporte eólico e por estarem melhores preservadas quando em contato com os derrames iniciais (Figura 5)(Scherer, 2002).



**Figura 4** - A) Feição de paleoduna preservada documentada por Rios et al. (2018) em Novo Hamburgo (RS).

Geodos com sedimentos – Geodos são vesículas que foram preenchidas posteriormente por material silicoso. Os geodos preenchidos por sedimentos são descritos por Michelin (2014) como vesículas preenchidas por clastos centimétricos de siltito argiloso, cimentados por sílica microcristalina e ocorrem próximos às fraturas preenchidas por sedimentos, em porções de meio e topo de derrame.

Fraturas preenchidas por arenitos – Descritas por múltiplos autores (Michelin, 2014; Rios et al., 2018), as fraturas preenchidas por arenitos são descritas como arenitos silicificados que ocorrem nas porções superiores dos derrames, preenchendo fraturas de diferentes origens (de resfriamento, tectônicas e geradas por stress interno) (Petry et al., 2007).



**Figura 5** - Modelo esquemático do desenvolvimento de unidades genéticas eólicas. A disponibilidade alta de areia associada a uma grande bacia permitiu a acumulação de dunas na unidade genética inferior (A). A interrupção da deposição dessa unidade foi consequência da velocidade e abundância dos derrames basálticos da FSG (B). O recobrimento das unidades genéticas inferiores diminuiu a disponibilidade de sedimentos, restringindo a deposição das unidades genéticas superiores a pequenas dunas crescentes e lençóis de areia (B–D) (Traduzido de Scherer, 2002).

## 2.3 PRODUTOS DA INTERAÇÃO LAVA-SEDIMENTO EM SISTEMAS PETROLÍFEROS

### 2.3.1 Rochas vulcânicas em sistemas petrolíferos

Nos últimos anos, estudos relacionados a rochas vulcânicas no contexto de sistemas petrolíferos têm sido documentados tanto estudando os efeitos do vulcanismo nesses sistemas (Schutter, 2003; Senger et al., 2017), como estudando as rochas vulcânicas como reservatório (Mizusaki, 1986, 1992; Farooqui et al., 2009; Reis, 2014).

Em reservatórios de rochas vulcânicas, as fraturas possuem os maiores valores de permeabilidade e porosidade em rochas ígneas dentre as estruturas dessas rochas, sua gênese está associada a fatores externos (tectônicos) ou internos (térmicos). Além disso, elas podem se originar durante a formação da rocha ou através de eventos tectônicos posteriores, podendo gerar tanto porosidade primária como secundária (Gudmundsson & Løtveit, 2014; Ran, 2019).

As diáclases ou disjunções colunares são o principal exemplo em que as fraturas geram porosidade primária. Essas estruturas são formadas nas rochas ígneas devido à perda de volume durante o resfriamento, formando colunas hexagonais ou pentagonais separadas por fraturas extensionais. As diáclases ocorrem tanto em derrames de lava como em soleiras, e o espaço entre as paredes das fraturas geradas, se preservado na rocha, aumenta seus valores de porosidade tanto verticalmente como horizontalmente (Delpino e Bermúdez, 2009; Gudmundsson & Løtveit, 2014).

Fraturas originadas por tectônica, também chamadas de fraturas estruturais, geram porosidade secundária na rocha, assim como permeabilidade, conectando outras estruturas porosas existentes. Em geral, essas estruturas são abundantes nas rochas ígneas e são afetadas por uma variedade de fatores: (1) A atividade tectônica na área, quanto mais intensa, maior o desenvolvimento de fraturas; (2) O período em que ocorreu essa atividade, fraturas mais antigas são frequentemente preenchidas por minerais secundários, diminuindo a porosidade; e (3) As propriedades físicas da rocha, rochas mais frágeis terão fraturas melhor desenvolvidas (Ran, 2019).

Vesículas são cavidades formadas pela liberação e expansão de gases que ficaram aprisionados durante o resfriamento da rocha (Gill, 2010). Essas cavidades podem ter de alguns milímetros até alguns metros de diâmetro e quando vazias podem ser bons reservatórios de petróleo em bacias produtoras. As vesículas quando preenchidas por minerais formam amígdalas e quando permanecem vazias, geram poros vesiculares. Mesmo preenchidas, as amígdalas podem possuir porosidade remanescente, ou ainda podem ser dissolvidas por fluidos posteriores (Zou, 2013). São observadas vesículas maiores próximas à parte superior do derrame, o que pode ser reflexo da pressão reduzida perto do topo (Gill, 2010).

Na Bacia de Hailar na China os depósitos de rochas riolíticas possuem vesículas bem desenvolvidas, com porosidade média em superfície de 8,3% e diâmetros variando entre 0,1mm e 100mm, mesmo que consideradas grandes há necessidade de fraturas ou microfraturas para conectá-las. As vesículas mostram papel secundário na geração de porosidade, já que são dependentes da existência de fraturas ou microfraturas para que exista permeabilidade (Zheng, 2018).

Os microporos (<0,01mm) também podem ter papel importante na geração de permeabilidade e de porosidade nas rochas vulcânicas, sendo eles os pequenos espaços remanescentes entre minerais de uma rocha após seu resfriamento ou espaços gerados pela alteração de minerais primários e/ou por esforços tectônicos. As feições apresentadas anteriormente (fraturas e vesículas) também podem existir em microescala. A microporosidade nas rochas vulcânicas pode ser classificada como “porosidade da matriz” (P’an, 1983; Mizusaki, 1986) devido aos valores de porosidade muito baixos e por estarem em porções da rocha não afetadas por fraturas.

Zou (2013) e Ran (2019) discutem processos que podem diminuir ou aumentar os espaços permo-porosos nas rochas ígneas como reservatório, destacando a compactação como o principal fator de obstrução de espaços nestas litologias. Durante o processo de alteração hidrotermal, a cloritização e o preenchimento por calcita e zeolitização mostram-se favoráveis ao desenvolvimento de espaço nas rochas, quando associados à percolação de fluidos posteriores.

Em rochas básicas, as fraturas desempenham um papel muito importante, pois essas rochas são mais susceptíveis a formação de fraturas. Wen (2019) estudando os reservatórios em rochas basálticas na Bacia de Sichuan na China, relatou que as fraturas são importantes não só para gerar conexão entre outras estruturas, como

vesículas ou poros intergranulares, mas também para permitir a circulação de fluidos posteriores, que contribuem na dissolução de minerais e conseqüentemente geração de porosidade.

Os mesmos fatores cruciais para a geração de permeabilidade e de porosidade em rochas vulcânicas têm potencial para gerar isso em contextos de interação vulcano-sedimentar. Arenitos silicificados encontrados em *intertraps* possuem valores baixos de porosidade, principalmente nos primeiros 0.1m-1m do contato com derrames, o que pode tornar a rocha ígnea principal reservatório nessa situação (Bertolini, 2019).

O estudo específico das sequências vulcano-sedimentares dentro do contexto de sistemas petrolíferos tem sido documentado recentemente (Jerram et al., 1999; Rawcliffe, 2016; Grove et al., 2017; Bertolini, 2019) e a importância de estudos envolvendo estas sequências tem sido destacada (Famelli et al., 2021). Isso deixa evidente não só a necessidade que existe atualmente de maior entendimento do papel dos produtos de interação vulcano-sedimentar em sistemas petrolíferos, mas também a necessidade de estudo dessas interações em locais aflorantes, que possam servir de modelo-base para situações geologicamente semelhantes encontradas em subsuperfície.

### 2.3 A IMPORTÂNCIA DA ELABORAÇÃO DE MODELOS ANÁLOGOS

Um análogo é um modelo geológico proposto com base em observações feitas em áreas acessíveis em superfície (aflorante), com características geológicas semelhantes a áreas de difícil acesso (geralmente em subsuperfície). O entendimento de feições e estruturas analisadas em superfície permite a compreensão de sistemas petrolíferos vulcânicos em subsuperfície, local que não pode ser integralmente visualizado de maneira detalhada. Um exemplo de análogo para o estudo em superfície de reservatórios não convencionais vulcânicos é a Formação Serra Geral na Bacia do Paraná, que apresenta uma grande distribuição espacial, espessura adequada, com afloramentos acessíveis desde a sua base até o topo das sequências incluindo derrames básicos e ácidos.

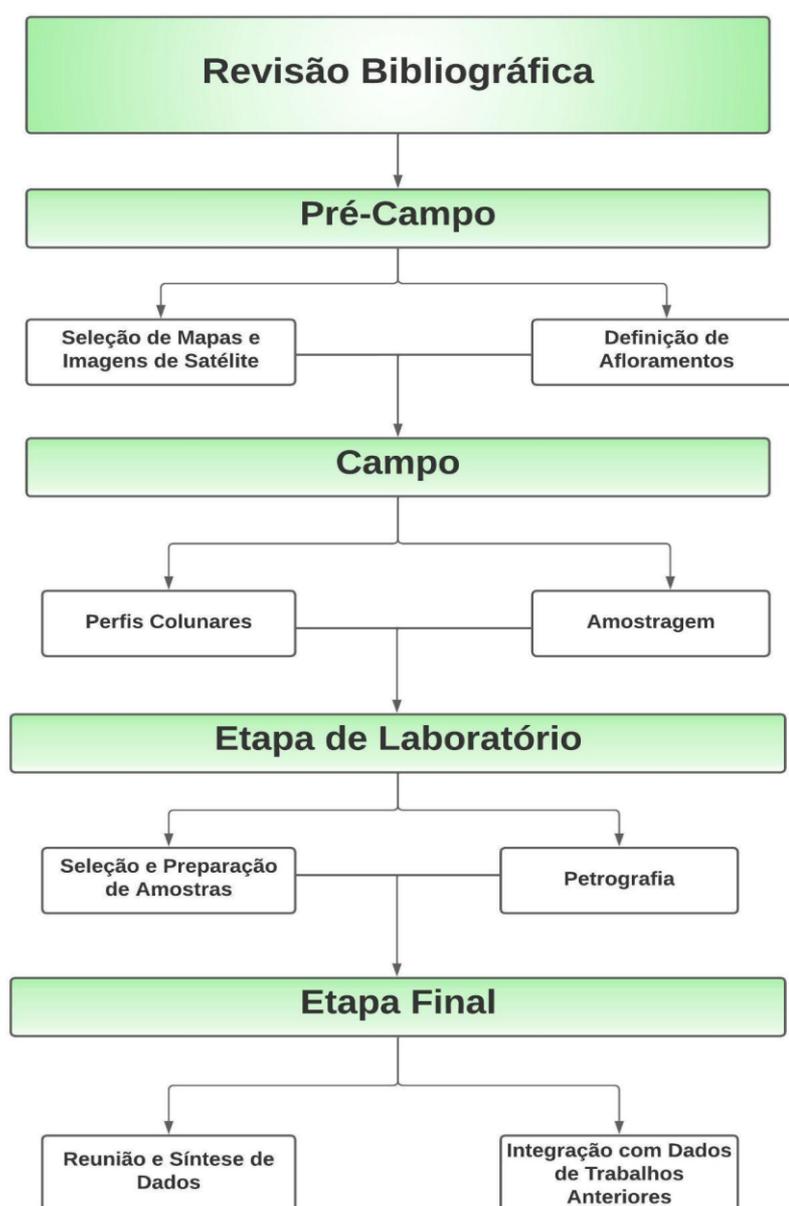
Slatt (2000) salienta que os afloramentos fazem uma ponte entre os dados pontuais extraídos dos poços e as seções sísmicas 3D de larga escala quando da prospecção de hidrocarbonetos. Reis (2014) propôs um modelo de reservatório de

hidrocarbonetos utilizando a Formação Serra Geral na Bacia do Paraná e seu contexto geológico como análogos ao modelo proposto em subsuperfície na Bacia de Campos (Rio de Janeiro, Brasil). Essa proposição é um exemplo da aplicação dos modelos de reservatório análogos, assim como abre margem para futuros trabalhos de mesma aplicação em diferentes contextos geológicos.

### 3. MÉTODOS

Para a realização desta monografia foram utilizadas diferentes técnicas analíticas que abrangem várias escalas de trabalho; desde descrições e elaboração de perfis colunares-estratigráficos, realizados em campo, até a identificação petrográfica das rochas estudadas.

A metodologia utilizada foi dividida em uma etapa inicial (pré-campo), etapa de campo, etapas de laboratório e de síntese do trabalho (pós-campo).



**Figura 6** - Fluxograma demonstrando a metodologia aplicada no trabalho.

### 3.1 ETAPA PRÉ-CAMPO

Foi realizado um levantamento bibliográfico referente ao assunto a ser desenvolvido, assim como uma seleção de mapas, fotos aéreas e imagens de satélites da região de estudo visando o reconhecimento de grandes estruturas, indícios de afloramentos e a localização dos melhores locais para realização dos perfis, seguindo descrições e indicações de Rios (2018).

### 3.2 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado nas proximidades dos municípios de Faxinal do Soturno, Santa Cruz do Sul e Ivoti, abrangendo afloramentos de corte de estrada e das Pedreiras Incopel e Novo Cabrais (abandonada). Nessa etapa foram realizados diferentes trabalhos:

Realização de amostragens: coletas de amostras, descrição macroscópica das mesmas.

Levantamento de dados estratigráficos: Elaboração de perfis colunares para reconhecimento e descrição das interações vulcano-sedimentares na área de estudo.

O código utilizado para identificação de pontos, amostras e perfis foi o seguinte: TCCE-1 à TCCE-14 para nomenclatura de afloramentos que foram descritos em campo, com o mesmo princípio de código para amostras com um adicional da letra correspondente à amostra coletada no ponto (Exemplo: TCCE-1-A para a amostra A coletada no ponto TCCE-1); Perfil 1, Perfil 2 e Perfil 3 para cada perfil colunar-estratigráfico elaborado, que estão em Anexo neste trabalho e devidamente associados aos locais onde foram encontrados. As referências à pontos de coleta, amostras e/ou perfis levantados neste trabalho a partir de então serão feitas utilizando esses códigos citados.

A etapa final de campo consistiu no processamento dos dados coletados, iniciando a digitalização dos perfis levantados no software *Adobe Illustrator*® e a seleção de amostras para laminação e demais análises a serem realizadas.

### 3.3 PETROGRAFIA

A análise petrográfica é importante para a identificação de minerais, assim como para a descrição de texturas, estruturas, tipos de poros e quantificação da porosidade de uma rocha. Neste estudo, foram analisadas cinco lâminas delgadas, preparadas a partir de amostras impregnadas com resina azul e descritas em microscópio óptico de polarização. As lâminas foram confeccionadas no Instituto de Geociências da UFRGS e a petrografia foi feita por microscopia óptica no microscópio Leitz Laborlux 12 em luz natural e polarizada, no Departamento de Paleontologia e Estratigrafia do Instituto de Geociências da UFRGS.

As amostras coletadas em trabalho de campo foram inicialmente fotografadas e descritas de forma macroscópica através de uma lupa, abrangendo questões de cor, textura, mineralogia e estruturas, objetivando também o auxílio na seleção das amostras que iriam ser analisadas no microscópio. As amostras selecionadas foram enviadas para laminação, confeccionadas e posteriormente descritas.

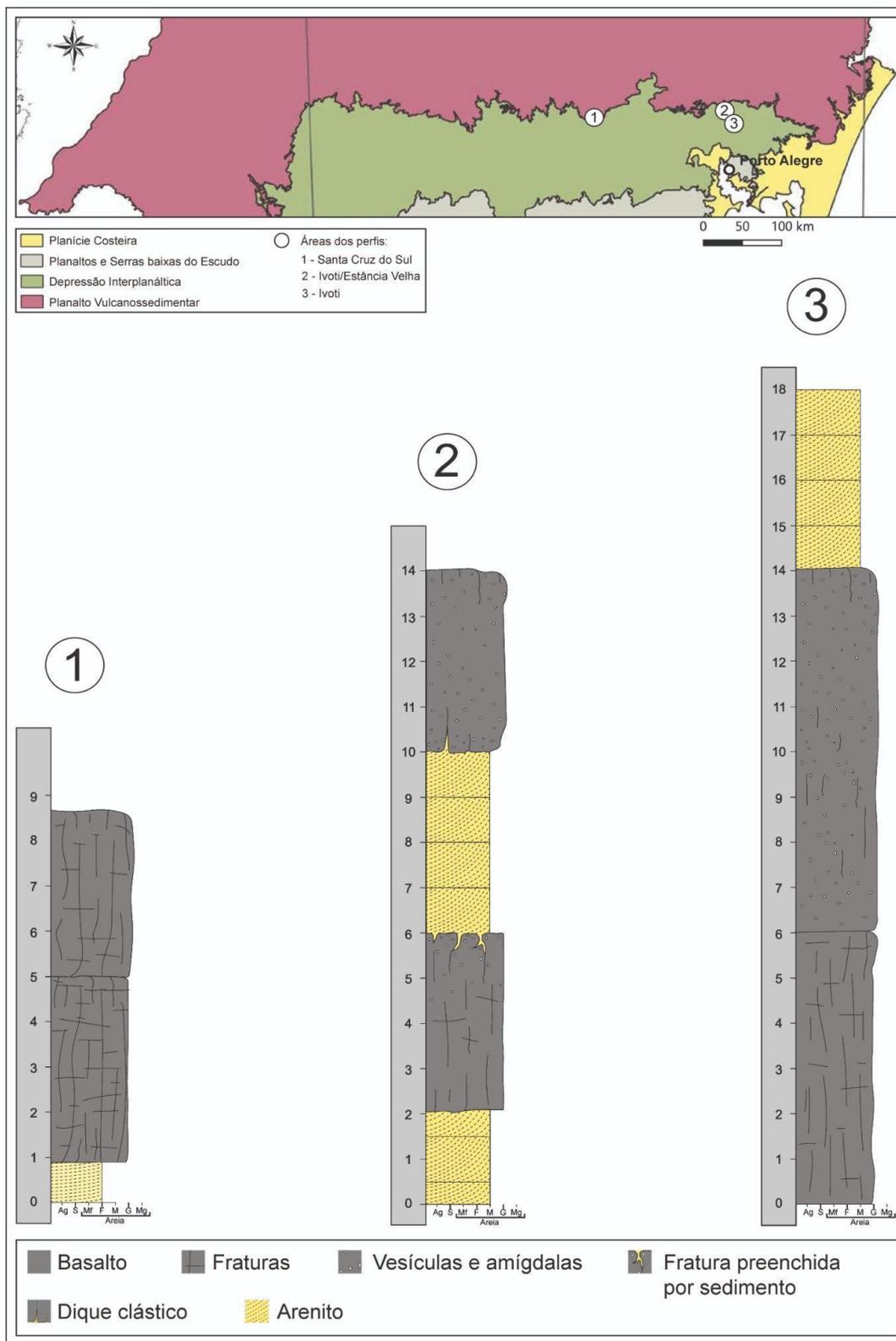
## 4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os produtos desta pesquisa. Os resultados advêm da reunião de dados da literatura e realização de trabalho de campo.

### 4.1 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo realizado na região de estudo teve como principais produtos os perfis colunares-estratigráficos (ver Anexos) elaborados para visualização da disposição estratigráfica dos *intertraps* encontrados em relação às diferentes porções do derrame.

Os perfis foram levantados ao longo da borda sudeste atual da Bacia do Paraná nos pontos indicados na Figura 7.



**Figura 7 -** Localização dos perfis levantados, unidade de medida dos perfis em metro.

#### 4.1.2 Perfis Colunares

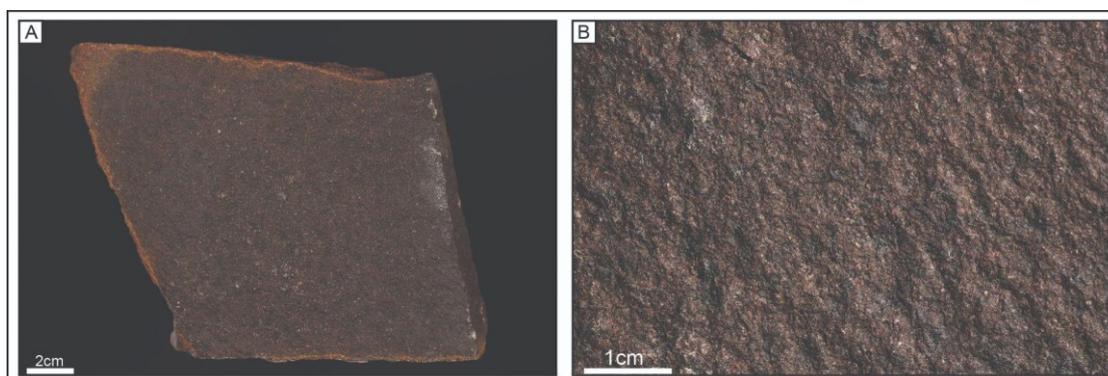
Os 3 perfis colunares-estratigráficos elaborados e digitalizados estão disponibilizados de forma integral na seção Anexos.

### 4.2 DESCRIÇÕES GERAIS

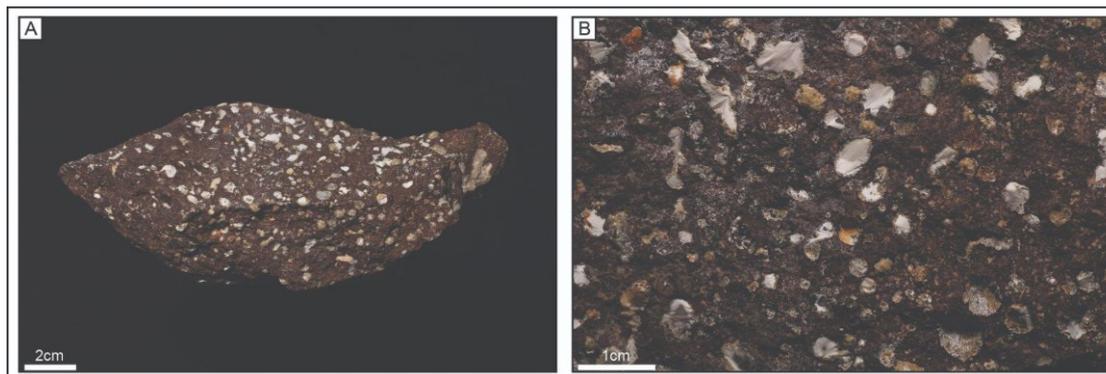
Esta seção discorre acerca das observações feitas em amostras dos pontos TCCE-1 ao TCCE-14, obtidas durante o trabalho de campo. As amostras selecionadas representam as melhores exposições das interações vulcano-sedimentares encontradas nos afloramentos visitados, assim como das litologias que estão envolvidas nessa interação em diferentes partes do derrame.

#### 4.2.1 Rochas Vulcânicas

Os derrames básicos ocorrem em grande parte da Bacia do Paraná, com grandes espessuras. Sua coloração é cinza escura, apresentando tons mais marrom-alaranjados quando muito alterados. Apresentam em sua maioria disjunções horizontais e verticais, são fraturados e nas porções de base e de topo apresentam vesículas preenchidas ou parcialmente preenchidas por zeólita, calcita, calcedônia e celadonita (Figura 9). Nos setores mais centrais do derrame apresentam muito fraturamento e a rocha é maciça de textura fina (Figura 8).



**Figura 8** - A) Amostra de mão coletada no setor sem vesículas do derrame. B) Detalhe da amostra destacando a textura fina e o aspecto maciço.

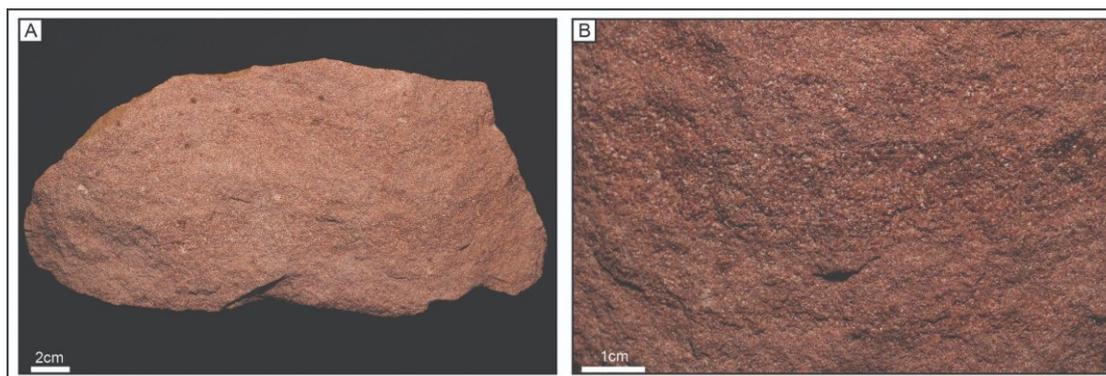


**Figura 9** - A) Amostra de mão coletada no setor vesicular do derrame (topo). B) Detalhe da amostra evidenciando as amígdalas preenchidas principalmente por zeolitas.

Os derrames ácidos demonstram-se mais espessos, ocorrem estratigraficamente acima dos derrames básicos e, comparados a estes, possuem morfologia bastante variada (tabulares, lenticulares e lobados, entre outras), também com disjunções horizontais e fraturas. As vesículas ocorrem de forma elíptica-alongada e são preenchidas preferencialmente por quartzo microcristalino.

#### 4.2.2 Rochas Sedimentares

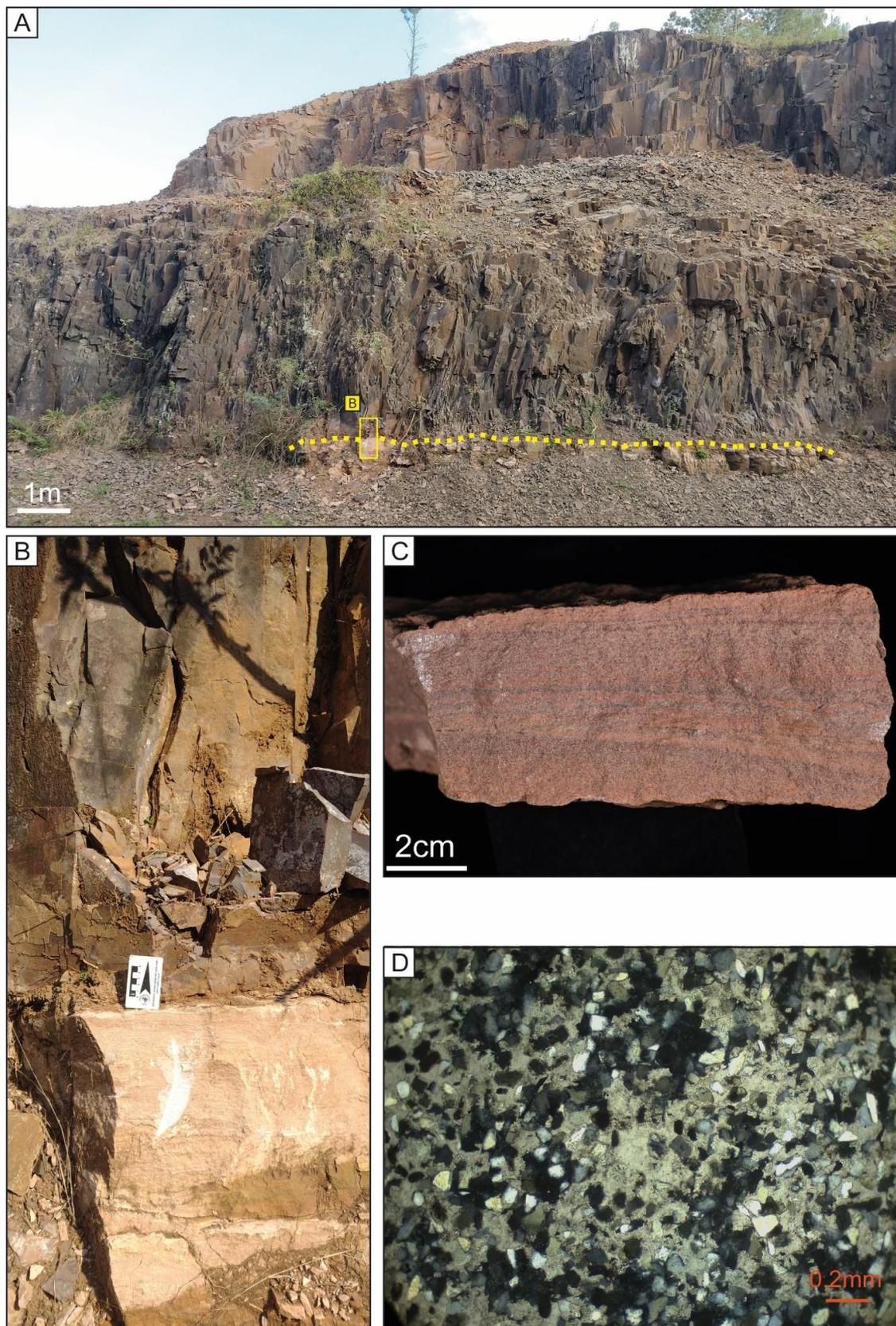
Os arenitos encontrados e descritos possuem estratificação cruzada acanalada, de médio a grande porte (1-30m), marcada principalmente pela textura bimodal laminada de foreset eólico (Figura 10). Sua granulometria varia de areia fina a grossa, possuem coloração rosada a avermelhada, de moderada a alta maturidade textural, com grãos predominantemente arredondados de composição predominantemente quartzosa, com aumento dos grãos de feldspato em alguns locais específicos. A mineralogia principal é definida por quartzo e feldspato, e acessória por apatita, zircão e turmalina. Em sua maioria, as ocorrências do arenito Botucatu possuem ótima porosidade com ausência de cimentação extensiva e de matriz, entretanto as amostras coletadas neste trabalho possuem sua porosidade obliterada por cimentação de calcedônia (Figura 14C) ou carbonática (Figura 11D), em decorrência da interação com os derrames básicos.



**Figura 10** - A) Amostra de mão de arenito Botucatu silicificado coletada na Pedreira Incopel, Ivoti (RS), perfil 3. B) Detalhe na amostra demonstrando o aspecto maciço do arenito silicificado, mas preservando características como sua bimodalidade.

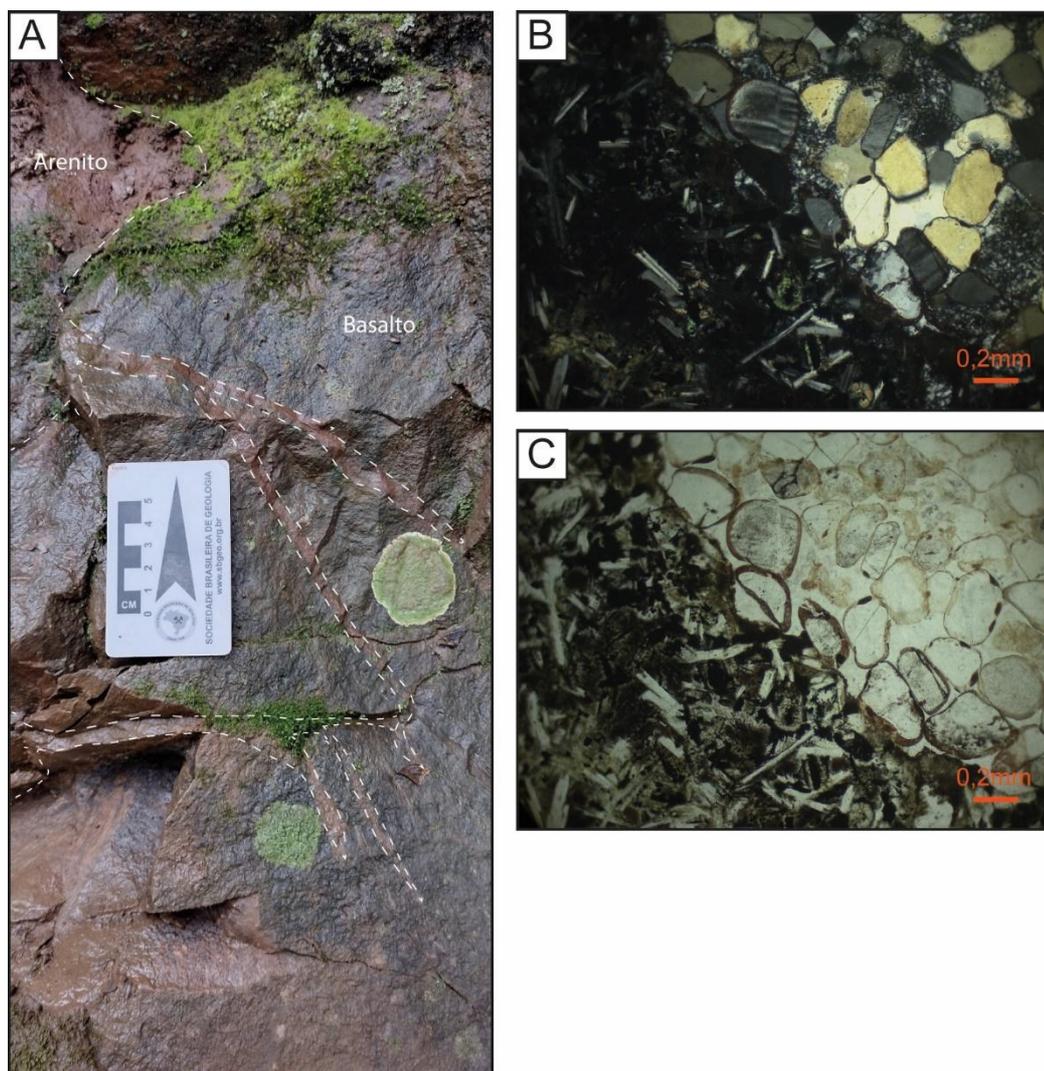
#### 4.2.3 Interações Vulcano-Sedimentares

Intercalados aos derrames, comuns na porção mais basal da sequência vulcânica, os *intertraps* de arenito definem-se por camadas de arenitos com dimensões métricas e algumas vezes centimétricas. São arenitos com estratificação cruzada planar marcada pela alternância de lâminas com granulometria variando de grossa a média, grãos subarredondados a arredondados, contatos pontuais e subordinadamente lineares. Composicionalmente são classificados como arenitos quartzosos a sub-arcóseos podendo ser cimentados por calcedônia (Figura 14C) ou carbonato (Figura 11D).

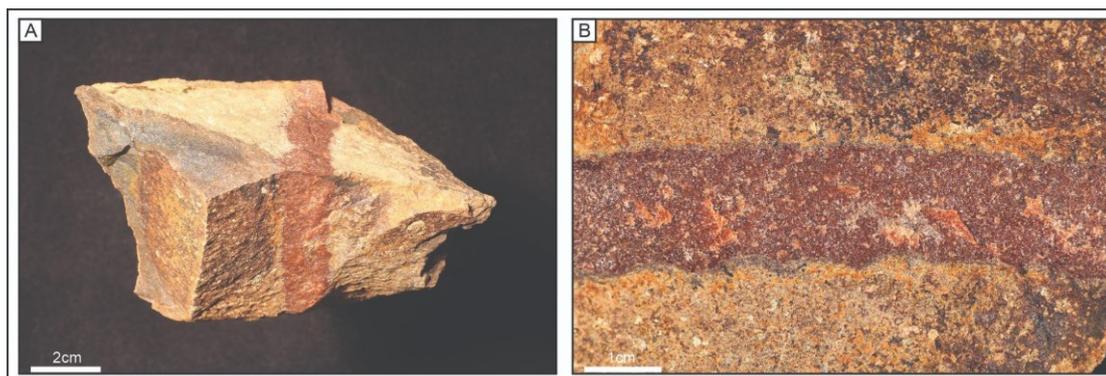


**Figura 11** - A) Derrame basáltico sobre uma lente preservada de arenito, perfil 1, município de Santa Cruz do Sul (RS); B) detalhe destacando o contato abrupto entre litologias; C) arenito quartzofeldspático com estratificação de baixo ângulo; D) fotomicrografia exibindo os grãos de quartzo e feldspato e a cimentação carbonática, nicóis cruzados.

Fraturas preenchidas por arenitos (Figura 12A) – apresentam ramificações e migram por entre as porções superiores dos derrames diminuindo a largura em direção a base. O arenito de preenchimento é fino a médio, com grãos arredondados de quartzo, feldspato e fragmentos líticos da encaixante e/ou de rochas sotopostas (basaltos). O contato entre os grãos é pontual e linear e como nos *intertraps*, a cimentação é predominantemente silicosa. Em alguns pontos ao longo do contato do arenito com a rocha encaixante ocorrem bordas de reação (Figura 13B).

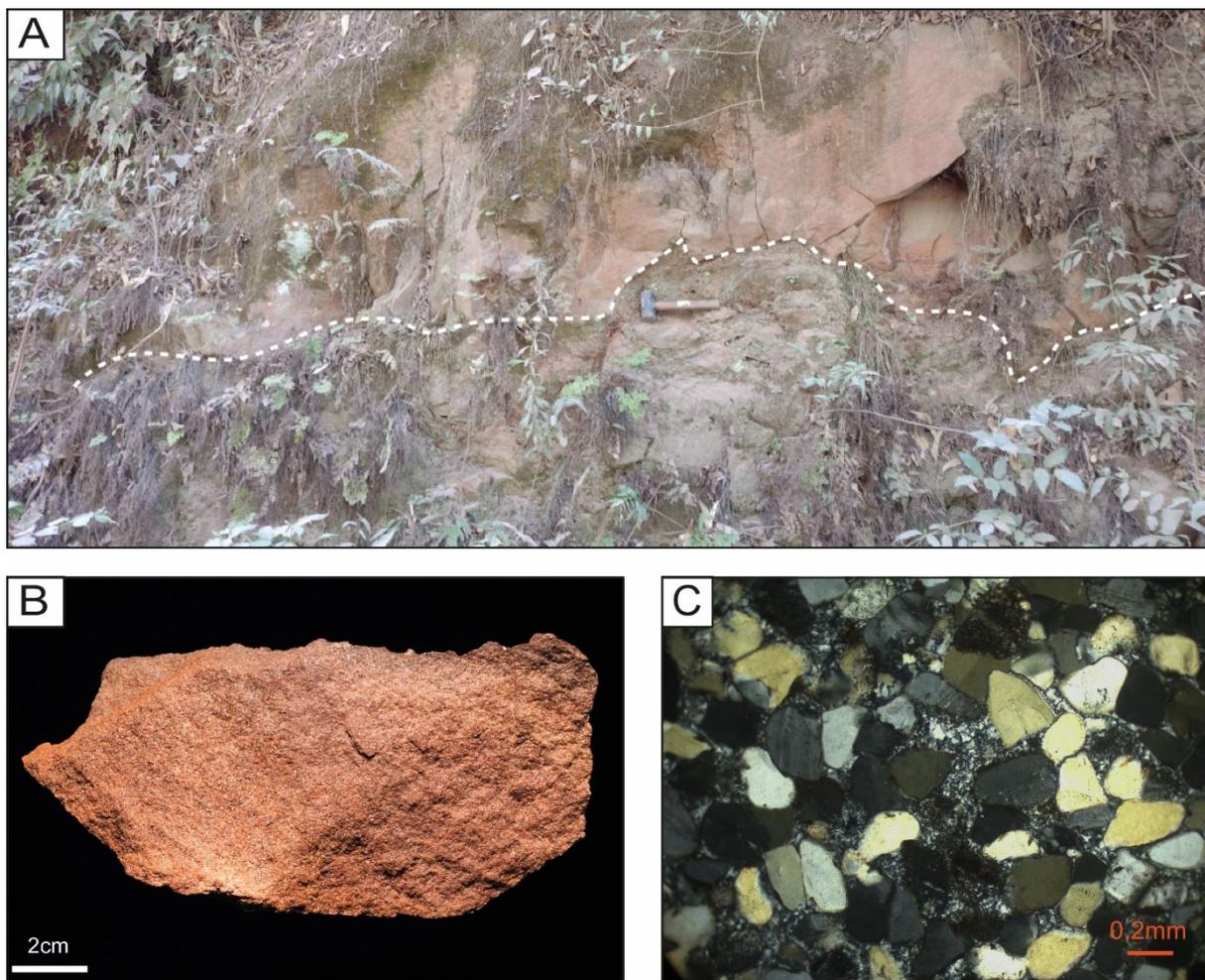


**Figura 12** - A) Fraturas preenchidas por arenito na porção superior do basalto em contato com o *intertrap*, perfil 2, município de Ivoti (RS); B) fotomicrografia do contato entre o dique de arenito e o basalto evidenciando a cimentação por calcedônia no arenito, a nicóis cruzados; C) fotomicrografia do contato entre o arenito e o basalto a nicóis descruzados, destaque para as bordas de oxidação nos grãos de quartzo, também observadas em lupa (ver Figura 12B).



**Figura 13** - A) Amostra de mão de fratura preenchida por arenito coletada em Ivoti (RS), perfil 2. B) Detalhe na amostra demonstrando a silicificação no arenito e um pequena borda de reação milimétrica.

Paleodunas Preservadas – Estas feições apresentam preservação significativa da paleodunas do antigo deserto Botucatu e representam o momento em que o primeiro derrame da Formação Serra Geral recobre dunas ainda ativas pertencentes à Formação Botucatu (unidades genéticas inferiores na Figura 5). Os arenitos quartzo feldspáticos que compõem estas paleodunas são caracterizados pela preservação da estratificação cruzada acanalada de médio a grande porte. Possuem grãos foscos arredondados a subarredondados, com alta maturidade textural e cimentação carbonática (Figura 11D).



**Figura 14** - A) Contato irregular entre porção de topo de derrame com *intertrap* arenoso, afloramento TCCE-12, perfil 2. B) Detalhe de amostra coletada do arenito *intertrap*. C) Fotomicrografia destacando a cimentação por calcedônia, nicóis cruzados.

## 5. DISCUSSÃO

As feições de interação vulcano-sedimentares encontradas durante o trabalho de campo revelaram silicificação intensa em todos os casos encontrados. Num contexto de sistema petrolífero, esses tipos de feições não seriam bons reservatórios ou caminhos para deslocamento de fluidos por exemplo, mas possivelmente bons selantes, justamente por causa da silicificação, que oblitera a porosidade desses arenitos. Entretanto, para isso ser possível, as rochas vulcânicas logo abaixo destes arenitos silicificados devem ter propriedades de rocha-reservatório para a possibilidade de acumulação de óleo e/ou gás ser plausível.

Ao estudar as rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos por exemplo, Mizusaki (1986) relatou a existência de microporosidade nessas rochas entre argilominerais resultantes da alteração de minerais primários. Os planos de clivagem dos feldspatos também apresentaram microporosidade, exemplificando casos relacionados tanto à porosidade primária, como secundária em rochas vulcânicas sendo o reservatório. Foram reportados valores de permeabilidade entre 0.7-1.0 mD e porosidade entre 0.7-7.5% para basaltos vesiculares. Não há relatos, entretanto, da ocorrência de feições de interação nesse sistema. Já os basaltos de Columbia River, relacionados a um grande evento vulcânico assim como a FSG, também são relatados na literatura como sendo reservatórios, nesse caso aquíferos nas rochas vulcânicas, apresentando um padrão de fraturas que interconecta as porosidades primárias e secundárias do basalto (Saar e Manga, 1999 *apud* Bertolini, 2019). Couves et al. (2016), analisando as propriedades petrofísicas das rochas vulcânicas das Ilhas Canárias, constataram que os melhores valores de porosidade e permeabilidade para que a rocha seja um bom reservatório estavam na parte superior dos derrames basálticos, justamente onde a porosidade vesicular é dominante. Nesta zona a rocha apresentou valores de porosidade e permeabilidade de 23,14% e 5,622mD respectivamente.

Rossetti et al. (2019) relatou algumas rochas vulcânicas da FSG como possuindo boas propriedades de reservatório, enquanto nos arenitos encontrados entre os derrames foram definidos baixos valores de permeabilidade (100-0.1mD) em uma zona próxima ao contato com os basaltos, o que reforça a possibilidade desses corpos agirem como selantes. Ao estudar o efeito dos derrames basálticos nas

propriedades petrofísicas desses arenitos entre derrames Bertolini et al. (2019) descreveu valores muito baixos de porosidade principalmente nos primeiros 0,1m-1m dos arenitos, destacando também a possibilidade destes corpos atuarem como rochas-selantes. É portanto plausível concluir que o contexto em que o *intertrap* arenoso caracteriza uma rocha selante em um sistema petrolífero possivelmente significativo seria quando ele ocorre na parte superior do derrame (zona vesicular), como documentado nos perfis 2 e 3 deste trabalho, pois nessa zona, como relatado pelos trabalhos citados acima, é onde podemos encontrar os melhores reservatórios no caso das rochas vulcânicas básicas.

Ran (2019) relatou processos que podem diminuir ou aumentar os espaços permo-porosos nas rochas ígneas como reservatório, destacando a compactação como o principal fator de obstrução de espaços nestas litologias. Durante o processo de alteração hidrotermal, a cloritização e o preenchimento por calcita e zeolitização mostram-se desfavoráveis ao desenvolvimento de espaço nas rochas, quando associados à percolação de fluidos posteriores. Isso é um fator a ser considerado em situações de sistemas petrolíferos, tendo em vista a presença comum de zeolitas nas amígdalas dos basaltos encontrados nos pontos deste trabalho próximas da interação vulcano-sedimentar por exemplo.

## 6. CONCLUSÃO

As feições de interação vulcano-sedimentares estudadas na borda sudeste atual da Bacia do Paraná se mostraram em todos os casos silicificadas. Isso abre margem para a possibilidade de elas serem bons selantes em contextos petrolíferos onde a rocha logo abaixo, vulcânica, possua boas características de reservatório. Esse contexto se mostra possível tendo em vista a magnitude dos grandes derrames vulcânicos associados à existência de corpos arenosos interagindo com eles.

O fato da porosidade tanto de *intertraps*, como de feições como fraturas preenchidas por arenitos, estar completamente obliterada principalmente por calcedônia, não só reforça a possibilidade desses corpos de atuarem como selantes, mas também impossibilita essas feições de serem reservatórios ou de serem possíveis caminhos de deslocamento de fluidos. Rochas em topos de derrame, ricas em vesículas, que possuam interconexão entre poros, podem ser bons reservatórios e estar associadas aos corpos arenosos silicificados, criando um contexto interessante do ponto de vista petrolífero. Isso abre margem para a continuidade de estudos envolvendo as interações vulcano-sedimentares, principalmente do ponto de vista de características petrofísicas das rochas associadas a esse contexto.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista brasileira de geociências**, v. 16, n. 4, p. 325-349, 1986.

ALVES, D. B. Desenvolvimento da metodologia de preparação de amostras para análise difratométrica de argilominerais no Centro de Pesquisas da Petrobrás. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 1, n. 2, p. 157-175, 1987.

BERTOLINI, G., HARTLEY, A. J., MARQUES, J. C., HEALY, D., & FRANTZ, J. C. The effects of basaltic lava flows on the petrophysical properties and diagenesis of interbedded aeolian sandstones: an example from the Cretaceous Paraná Basin, Brazil. **Petroleum Geoscience**, v. 27, n. 2, p. petgeo2020-036, 2021.

COUVES, C.; ROBERTS, S.; RACEY, A.; TROTH, I.; BEST, A. Use of X-ray computed tomography to quantify the petrophysical properties of volcanic rocks: a case study from Tenerife, Canary Islands. **Journal of Petroleum Geology**, v. 39, n. 1, p. 79-94, 2016.

DE SORDI, M. V.; PAISANI, J. C.; PEREIRA, J. S. Condicionamento litoestrutural e diferenciação preliminar dos vales do planalto vulcânico sul-rio-grandense a partir de parâmetros morfométricos da drenagem. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 48, n. 4, 2021.

DE SOUZA, F. G., JUNQUEIRA-BROD, T. C., BROD, J. A., MENDES CAIXETA DE PAMPLONA ARAÚJO, I., FREITAS CARVALHO, J., VIEIRA CARDOSO, S., & SIQUEIRA MATOS-PIMENTEL, H. L. Textural and Mineralogical Evidence of Volcano-Sedimentary Interaction in the North Edge of the Serra Geral Formation, Goiatuba, Goiás, Brazil. Goiatuba, Goiás, Brazil.

DELPINO, D.H. & BERMÚDEZ, A.M. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). **The Leading Edge**, v. 28, n. 7, p. 804-811, 2009.

DESCOVI, P. L., ADE, M. V. B., de Oliveira AVELLAR, G., BERMÚDEZ, S. L. B., & VIEIRA, F. P.. Volcanic reservoirs: historic and current context. **Pesquisas em Geociências**, v. 48, n. 1, p. e104451-e104451, 2021.

FAMELLI, N.; LIMA, E. F.; CARMO, I. O. Lithostratigraphy of the Serra Geral Formation in the northern portion of the Parana-Etendeka Igneous Province: A tool for tracking Early Cretaceous paleoenvironmental changes. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 410, p. 107152, 2021.

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

GILL, R. *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. 1. ed. Chichester, West Sussex, UK: Editora Wiley & Blackwell, 2010.

GUDMUNDSSON, A. & LØTVEIT, I.F. Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: examples and models. Geological Society, London, Special Publications, v. 374, n. 1, p. 251-271, 2014.

GROVE, C., JERRAM, D. A., GLUYAS, J. G., & BROWN, R. J. Sandstone diagenesis in sediment–lava sequences: exceptional examples of volcanically driven diagenetic

compartmentalization in Dune Valley, Huab Outliers, NW Namibia. **Journal of Sedimentary Research**, v. 87, n. 12, p. 1314-1335, 2017.

HOLZ, M., FRANÇA, A. B., SOUZA, P. A., IANNUZZI, R., & ROHN, R. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 2, p. 381–399, 2010.

HOLZ, M.; SOARES, A. P.; SOARES, P. C. Preservation of aeolian dunes by pahoehoe lava: an example from the Botucatu Formation (Early Cretaceous) in Mato Grosso do Sul state (Brazil), western margin of the Paraná Basin in South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 25, n. 3, p. 398-404, 2008.

JERRAM, D. A.; MOUNTNEY, N.; STOLLHOFEN, H. Facies architecture of the Etjo Sandstone Formation and its interaction with the Basal Etendeka Flood Basalts of northwest Namibia: implications for offshore prospectivity. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 153, n. 1, p. 367-380, 1999.

JERRAM, Dougal A. et al. Death of a sand sea: an active aeolian erg systematically buried by the Etendeka flood basalts of NW Namibia. **Journal of the Geological Society**, v. 157, n. 3, p. 513-516, 2000.

JERRAM, D. A.; STOLLHOFEN, H. Lava–sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result of magma–water interaction?. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 114, n. 1-2, p. 231-249, 2002.

MAGOON, L.B.; DOW, W.G. The Petroleum System-From Source to Trap. **American Association of Petroleum Geologists Memoir**, 60, 655 p, 1994.

MICHELIN, C. R. L. Ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil): uma caracterização com base em técnicas estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e isotópicas. 2014. Tese de Doutorado. Brasil.

MILANI, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-oriental. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 255p.

MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 199–205, 1999.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p.265–287, 2007.

MIZUSAKI, A.M.P. Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos: caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos. Rio de Janeiro, 1986. 104 p. Tese (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

P'AN, C.H. Petroleum in basement rocks. **AAPG Bulletin**, v. 66, n. 10, p. 1597-1643, 1982.

PICCIRILLO, E. M. & A. J. Melfi. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988.

PICCIRILLO, E. M. et al. Continental flood volcanism from the Paraná Basin (Brazil). In: **Continental flood basalts**. Springer, Dordrecht, 1988. p. 195-238.

POLO, L. A. 2014. O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka na região de Gramado Xavier, RS: estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo. São Paulo, 340 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

RAN, Q.; REN, D.; WANG, Y. Development of Volcanic Gas Reservoirs: The Theory, Key Technologies and Practice of Hydrocarbon Development. 1. ed. Gulf Professional Publishing, 2019.

RAWCLIFFE, H. J. Lava-water-sediment interaction: processes, products and petroleum systems. 2016. Tese de Doutorado. University of Glasgow.

REIS G. S. et al. Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira, Porto Alegre, UFRGS, **Pesquisas em Geociências**, 41 (2): 155-168, maio/agosto de 2014.

RIOS, F.R., MIZUSAKI, A.M.P., MICHELIN, C.R.L. 2018. Feições de interação Vulcano sedimentares – exemplos na Bacia do Paraná (RS). **Geociências**, UNESP, v. 37, n. 3, p. 483-495.

ROSSETTI, Lucas M. et al. 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.

SCHERER, C.M.S. Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. 202p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SCHERER, C.M.S. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in Southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology**, v. 137, p. 63–84, 2000.

SCHERER, C.M.S. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentology**, v. 49, p. 97-116, 2002.

SCHNEIDER, R. . (PETROBRÁS) et al. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. Congresso brasileiro de Geologia. **Anais...**1974.

SCHUTTER, S.R. Hydrocarbon Occurrence and Exploration in and Around Igneous Rocks. In: PETFORD, N. & MCCAFFREY, J.W. (eds). Hydrocarbons in Crystalline Rocks. Geological Society Special Publications, v. 214, p. 7-33, 2003.

SENGER, K.; MILLETT, J.; PLANKE, S.; OGATA, K.; EIDE, C.H.; FESTØY, M.; GALLAND, O; JERRAM, D.A. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review. *First Break*, v. 35, n. 6, 2017.

SLATT, R. M. AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication No. 68, Chapter 17: Why Outcrop Characterization of Turbidite Systems. 2000.

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

WAICHEL, B. L. et al. Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood Basalts, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 159, n. 4, p. 343-354, 2007.

WAICHEL, Breno L.; SCHERER, Claiton MS; FRANK, Heinrich T. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: features and emplacement aspects. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 171, n. 1-2, p. 59-72, 2008.

WEN, L.; LI, Y.; YI, H.; LIU, X.; ZHANG, B.; QIU, Y.; ZHOU, G.; ZHANG, X. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry B*, v. 6, n. 5, p. 452-462, 2019.

ZALÁN, P. V. et al. Bacia do Paraná. **Origem e evolução das bacias sedimentares**, p. 135-168, 1990.

ZALÁN, P. V. et al. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. In: **International Gondwana Symposium**. 1991. p. 83-117.

ZHENG, H.; SUN, X.; ZHU, D.; TIAN, J.; WANG, P.; ZHANG, X. Characteristics and factors controlling reservoir space in the Cretaceous volcanic rocks of the Hailar Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, v. 91, p. 749-763, 2018.

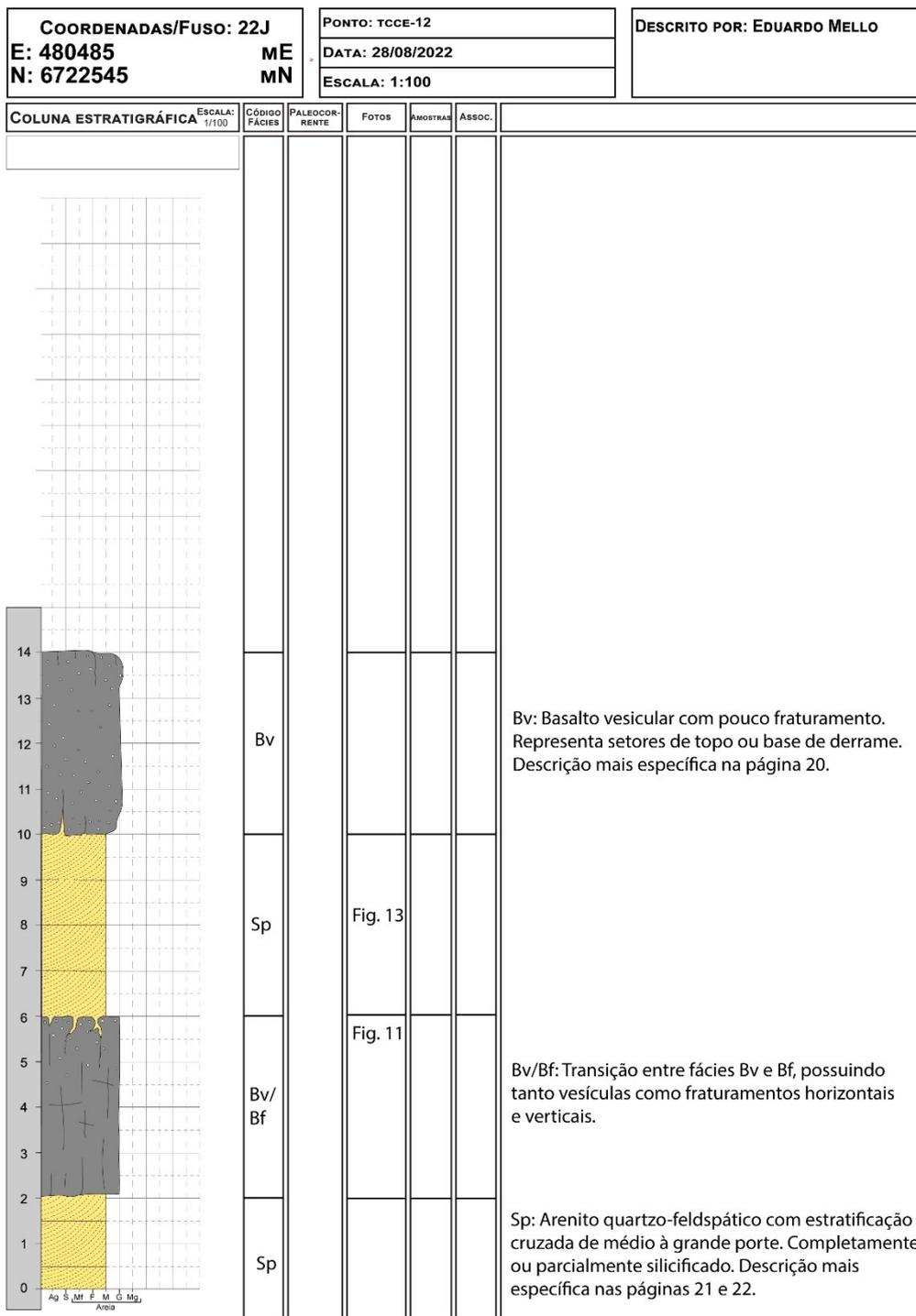
ZOU, C. *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*. 1. ed. Elsevier, 2013.

## ANEXOS

## Anexo 1 – Perfis colunares estratigráficos

COORDENADAS/FUSO: 22J E: 306672 N: 6707644		ME MN		PUNTO: TCCE-2 DATA: 26/08/2022 ESCALA: 1:100			DESCRITO POR: EDUARDO MELLO
COLUNA ESTRATIGRÁFICA	ESCALA: 1/100	CÓDIGO FÁCIES	PALEOCORRENTE	FOTOS	AMOSTRAS	ASSOC.	
		Bf					Bf: Basalto sem vesículas com muito fraturamento horizontal e vertical. Representa setores de meio de derrame. Descrição mais específica na página 20.
		Bf		Fig. 10			
		Sl					Sl: Arenito com estratificação de baixo ângulo (cruzada[?]). Descrição mais específica na página 21. (Ver Figura 10).

Perfil 1 – Realizado em Santa Cruz do Sul (RS) no ponto TCCE-2.



Perfil 2 – Realizado em Ivoti/Estância Velha no ponto TCCE-12.

COORDENADAS/FUSO: 22J E: 485732 N: 6722123		PONTO: TCCE-14 DATA: 29/08/2022 ESCALA: 1:100		DESCRITO POR: EDUARDO MELLO			
COLUNA ESTRATIGRÁFICA	ESCALA: 1/100	CÓDIGO FÁCIES	PALEOCORRENTE	FOTOS	AMOSTRAS	ASSOC.	
		Sp		Fig. 9			Sp: Arenito quartzo-feldspático com estratificação cruzada de médio à grande porte. Completamente ou parcialmente silicificado. Descrição mais específica nas páginas 21 e 22.
		Bv		Fig. 8			Bv: Basalto vesicular com pouco fraturamento. Representa setores de topo ou base de derrame. Descrição mais específica na página 20.
		Bf		Fig. 7			Bf: Basalto sem vesículas com muito fraturamento horizontal e vertical. Representa setores de meio de derrame. Descrição mais específica na página 20.

Perfil 3 – Realizado em Ivoti no ponto TCCE-14.