

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

HETEROGENEIDADE DA POROSIDADE DE ARENITO
FLUVIAL DA FORMAÇÃO RESENDE NAS BACIAS DE SÃO
PAULO, TAUBATÉ, RESENDE E VOLTA REDONDA

Monografia

TF-22/59

Aluna: Tirzah Loriato Moraes Silva

Orientadora: Profa. Dra. Lucy Gomes Sant'Anna

São Paulo

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

HETEROGENEIDADE DA POROSIDADE DE ARENITO FLUVIAL DA
FORMAÇÃO RESENDE NAS BACIAS DE SÃO PAULO, TAUBATÉ,
RESENDE E VOLTA REDONDA

TF - 22/59

Monografia apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Área de concentração: Energia, geologia sedimentar e ambiental.

Orientador: Profa. Dra. Lucy Gomes Sant'Anna.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Tereza Lúcia e Rodolfo por todo amor, carinho e apoio que sempre me ofereceram, vocês sempre serão meus grandes amores!

Dedico também aos meus amados avós, Tereza Walquiria, Dário Francisco, Esther e Silvério, sem seu apoio ao longo da vida, e deste trabalho, a conclusão deste trabalho seria inviável. Também aos meus queridos padrinhos, tios e primos que moram no meu coração. Em especial tia Ângela e tio Beto que me auxiliaram nos campos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas na Cláusula de P,D&I da Resolução ANP no 50/2015 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL No1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19). Agradecemos o apoio do RCGI – Research Centre for Gas Innovation, localizado na Universidade de São Paulo (USP) e financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2014/50279-4 e 2020/15230-5) e Shell Brasil, e a importância estratégica do apoio dado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) através do incentivo regulatório associado ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação.

Agradeço também à minha orientadora Lucy Gomes Sant’Anna e ao meu antigo orientador Thiago Luis Felipe Brito, que me guiaram na área acadêmica durante a graduação e este Trabalho de Formatura. Agradecimento especial ao Professor Renato Ramos, que me auxiliou em tudo que precisei ao longo da pesquisa. A Ana Beatriz de Barros e Erika Millanao do Laboratório de Caracterização de Rochas e Sistemas Petrolíferos do IEE/USP pelo auxílio na preparação das amostras para impregnação da porosidade. Ao Setor de laminação de Rochas do IGc/USP pela confecção das seções delgadas.

Aos Professores André Negrão, André Sawakuchi, Fábio R. D. de Andrade, Eliane A. D. Lama, Ivo Karmann, Marcos E. Silva, Paulo C. Boggiani, Renato de Moraes, Renato P. de Almeida, Valdecir de A. Janasi, Gergely A. J. Szabo que me guiaram e inspiraram ao longo da graduação.

Agradeço aos meus amigos de longa data Giulia Favotto, Maria Eduarda Schettini, Juliana Dourado, Amanda Braccini, Sophia Araujo, Michel Megid, Vitória Fayet, Fernando Gorgulho, Isabela Dourado, Rafael Moreira, Julia Sampaio, Tiago Nakata, Bianca Miyarraha, e Dulce Lage. Graças a vocês me tornei a pessoa que sou hoje.

Aos meus amigos que tive o prazer de conhecer ao longo da graduação Afetada, Miope, Xoppz, JayZ, Molotov, Fuinha, Chiqueto, Tranoiah, Cara Suja, Ricardo Tichauer, Maria Pelissari, Charada, Piuí, MagmarJr, Frida, Abalone, e Mika. Em especial a Vitória Cruz, Juliana Sabrina Silva e Putin que estavam ao meu lado nos momentos mais incríveis e difíceis da graduação.

A Deus e meus mentores espirituais que me protegem e guiam ao longo da vida.

SUMÁRIO

1. RESUMO	5
2. ABSTRACT	5
3. INTRODUÇÃO	6
4. METAS E OBJETIVOS	8
5. JUSTIFICATIVA	8
6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
6.1 Aquecimento Global	9
6.2 Fontes Emissoras Fixas de CO ₂	10
6.3 CCS (<i>Carbon Capture and Storage</i>)	10
6.4 Porosidade	12
6.5 Formação Resende	14
6.6 Projetos Internacionais de CCS	17
6.6.1 EUA	17
6.6.2 Austrália	18
7. MATERIAIS E MÉTODOS	19
7.1 Levantamento bibliográfico	19
7.2 Mapas e georreferenciamento	19
7.2.1 Uso do <i>software</i> Vector	20
7.3 Levantamento de campo e coleta de amostras	20
7.4 Descrição macroscópica de amostras	20
7.5 Análise da porosidade	21
7.5.1 Uso do <i>software</i> ImageJ	21
8. RESULTADOS OBTIDOS	22
8.1 Levantamento de fontes emissoras fixas de CO ₂	22
8.2 Levantamento de campo e coleta de amostras	24
8.3 Fácies sedimentares da Fm. Resende nas bacias de Resende e Volta Redonda	27
8.4 Características principais das fácies e amostras analisadas	35
8.5 Análise da porosidade	41
8.5.1 Análise da porosidade por MO	41
8.5.2 Análise da porosidade por MEV	46
9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
10. CONCLUSÕES	58
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. RESUMO

A tecnologia CCS (*Carbon Capture and Storage*) é formada por uma gama de técnicas integradas que impedem que determinadas quantidades de CO₂ sejam liberadas para a atmosfera, auxiliando na redução de emissões dos gases de efeito estufa e na mitigação das mudanças climáticas. A utilização da tecnologia CCS é de extrema importância nos dias atuais, tendo em vista as metas internacionais de redução de emissão de carbono que visa limitar o aquecimento médio da atmosfera a 1,5°C. Neste trabalho foram realizados estudo bibliográfico, trabalhos de campo e análises microscópicas de porosidade de arenitos paleógenos da Formação Resende nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende, e Volta Redonda, no sudeste brasileiro, a fim de analisar a viabilidade de uso dessas rochas para armazenamento geológico de CO₂. Os dados a serem obtidos poderão ser empregados para análise de arenitos da Bacia de Santos, pois estas bacias, *onshore* e *offshore*, apresentam arenitos de mesma idade e talvez contexto pós-sedimentares com similaridades.

2. ABSTRACT

The CCS (*Carbon Capture and Storage*) technology comprises a range of integrated techniques that prevent certain amounts of CO₂ from being released into the atmosphere, helping to reduce greenhouse gas emissions and mitigate climate change. The use of CCS technology is extremely important nowadays, in view of the international carbon emission reduction goals that aim to limit the average warming of the atmosphere to 1.5°C. In this work, a bibliographic study, field work and microscopic analysis of porosity of paleogenous sandstones from the Resende Formation were carried out in the São Paulo, Taubaté, Resende, and Volta Redonda basins, in southeastern Brazil, in order to analyze the feasibility of using these rocks for geological storage of CO₂. The data to be obtained can be used for the analysis of sandstones in the Santos Basin, as these basins, *onshore* and *offshore*, present sandstones of the same age and perhaps post-sedimentary context with similarities.

3. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações da atualidade é o Aquecimento Global, tendo em vista que o aquecimento médio da superfície terrestre afetará negativamente a qualidade de vida humana. As pesquisas indicam que a temperatura média da atmosfera terrestre deve aumentar entre 1,5°C a 2°C até 2100. Portanto, as principais causas desse aquecimento devem ser reduzidas ao máximo, e o quanto antes (MASSON-DELMOTTE, Valérie; *et al.*, 2018).

A principal causa dessa mudança climática é a emissão de gases do efeito estufa para atmosfera, sendo um dos principais o CO₂. As fontes emissoras desses gases se dividem em duas categorias: móveis e estacionárias. Entre as fontes móveis podemos citar como principais representantes os meios de transporte movidos a combustíveis fósseis. Já as fontes estacionárias se caracterizam por ocuparem uma área limitada com possibilidade de avaliação direta na fonte, em geral, ligadas a atividades industriais de transformação, mineração e produção de energia em usinas termelétricas (MMA, 2022).

As preocupações com as consequências adversas do aquecimento global têm levado à criação de tecnologias para diminuir a quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera. Uma destas tecnologias é o CCS (*Carbon Capture and Storage*), que engloba a captura, o transporte e a estocagem em profundidade do CO₂ emitido por fontes estacionárias, impedindo que este chegue a atmosfera e contribua para o aquecimento global (Global CCS Institute, 2022).

A primeira vez que o CO₂ foi descartado no subsolo, ou seja, a primeira vez que um projeto de CCS em escala comercial foi iniciado, ocorreu em 1996, no Projeto de Armazenamento do Aquífero Salino Sleipner (Baklid *et al.*, 1996), que indicou que a técnica de CCS é segura a uma taxa de 1 Mt/ano e ajudou a compreensão da migração da pluma de CO₂ (Kelemen, 2019).

Atualmente, os projetos de CCS têm utilizado quinze critérios, divididos em seis categorias, para avaliação da área de interesse de armazenamento geológico de CO₂ (Bachu, 2010). Essas categorias abrangem as características da bacia sedimentar, como tectônica, estratigrafia, hidrogeologia e geotermia; recursos da bacia e maturidade da indústria; fontes de CO₂, acessibilidade e infraestrutura, e condições climáticas; fatores econômicos, políticos e sociais (Bachu, 2010). Um dos principais critérios é a proximidade das fontes de captura de CO₂ ao local de armazenamento, pois a grande distância entre a fonte de captura e o local de armazenamento torna a prática inviável economicamente (Bachu, 2010).

Tendo em vista o critério quanto a proximidade entre as fontes de captura de CO₂ e o local de armazenamento, foi observado que as regiões próximas aos depósitos da Formação Resende, situadas no nordeste do estado de São Paulo, sul do estado do Rio de Janeiro e sudeste de Minas Gerais, apresentam grandes emissões de CO₂ (Rockett, 2010). A princípio, a região mais próxima com possibilidade de armazenamento geológico de CO₂ seria a Bacia do Paraná (Fig. 2). No entanto, a distância entre as fontes emissoras nessa porção do país e a Bacia do Paraná inviabilizam a atividade, tendo em vista que a distância superaria a viabilidade econômica (Bachu, 2010).

Assim, visando a busca de alternativas de reservatórios geológicos para estocagem, este trabalho objetiva o estudo da heterogeneidade da porosidade de arenito fluvial paleógeno da Formação Resende, presente nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (Figs. 1 e 2), a fim de avaliar o potencial deste arenito para o armazenamento geológico de CO₂ capturado nesta porção do sudeste brasileiro, onde ocorre grande parte das emissões nacionais. Os dados obtidos poderão ser empregados para a análise de arenito fluvial de outras bacias sedimentares, *onshore* e *offshore*, que apresentam arenitos de mesma idade e talvez contexto pós-sedimentares com similaridades, principalmente na Bacia de Santos.

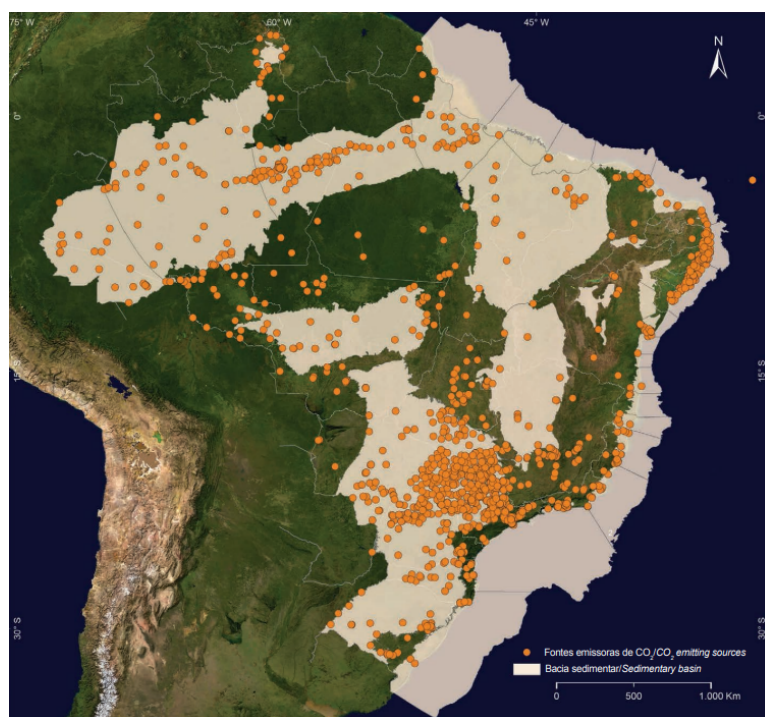


Figura 1: Bacias sedimentares e fontes emissoras de CO₂ no Brasil, com as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende, Volta Redonda, Sergipe-Alagoas, Araripe, Pernambuco-Paraíba, Jacuípe, Camamu-Almada, Jequitinhonha, Cumuruxatiba, Mucuri, Espírito Santo, Campos, Santos, Pelotas, Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará, Potiguar, Tacutu, Marajó, São Luís/Bragança-Vizeu/Ilha Nova, Recôncavo, Tucano Sul, Central e Norte, Jatobá, Solimões, Amazonas, Parnaíba, Paraná, São Francisco (Ketzer, 2015).



Figura 2: Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil - 1) Cráton do São Francisco; 2) Cinturão Brasília; 3) Terreno Cabo Frio; 4) Terreno Oriental - Domínio Costeiro; 5) Terreno Oriental - Arco Magmático Rio Negro; 6) Klippe Paraíba do Sul; 7) Terreno Ocidental; 8) Bacia do Paraná; 9) corpos alcalinos do Cretáceo Superior a Eoceno; 10) bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB): A - São Paulo; B - Taubaté; C - Resende; D - Volta Redonda; E - Macacu; F - Itaboraí; G - Barra de São João; 11) sedimentos cenozóicos indiferenciados; 12) falhas reversas, nappes; 13) Alinhamento Magmático de Cabo Frio; 14) limites de grábens do RCSB. Fontes: Riccomini *et al.* (2004).

4. METAS E OBJETIVOS

O presente trabalho visa a caracterização da heterogeneidade da porosidade de arenito fluvial da Formação Resende, aflorante nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, visando avaliar seu potencial para o armazenamento geológico de CO₂ capturado nesta porção do sudeste brasileiro.

5. JUSTIFICATIVA

Como dito anteriormente, há uma urgência mundial de frear o aumento da temperatura média da superfície da Terra. Tecnologias como o CCS prometem um grande passo em direção a este objetivo, já que visam diminuir os impactos ambientais de várias atividades antrópicas emissoras de gases de efeito estufa, em especial o CO₂.

O CCS é uma tecnologia que possui a capacidade de estocar CO₂ emitido por fontes estacionárias, isto é, fontes de emissão de CO₂ que ocupam área limitada com possibilidade de avaliação direta na fonte. Em geral, são áreas ligadas a atividades industriais de transformação, mineração e produção de energia em usinas termelétricas (MMA, 2022).

Considerando a variedade e quantidade de fontes estacionárias na região sudeste do país, principalmente com as usinas termelétricas fósseis (IEMA, 2021), este trabalho pode auxiliar na ampliação do entendimento da utilização de tal tecnologia em território brasileiro, a partir do estudo de bacia sedimentares ainda não abordadas com esse foco.

6. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 Aquecimento Global

O Aquecimento Global é uma das principais preocupações mundiais da atualidade, tendo em vista que o aquecimento médio da superfície terrestre causa mudança climática. Tal mudança climática pode impactar os serviços ecossistêmicos, o que acaba por afetar a saúde, bem-estar e meios de subsistência humanos (PÖRTNER, Hans et al., 2021).

A compreensão dos elementos fundamentais do sistema climático é robusta e bem estabelecida. Estudos de evidências de arquivos naturais possibilitam que pesquisadores façam reconstruções do clima passado e cenários do clima futuro, providenciando uma perspectiva de como o clima da Terra varia em longo prazo (ARIAS, Paola A. et al., 2021).

Utilizando registros de bolhas de ar aprisionado pelo gelo na Antártica, é possível medir a quantidade de CO₂ em ppm na atmosfera do período em que o ar foi aprisionado. Os registros mais antigos remontam a 800.000 anos atrás (UNEP, 2020). Estes estudos indicaram que a temperatura média da superfície terrestre e a concentração de CO₂ na atmosfera estão atrelados (e.g. Hansen 2005). Também se observou que, desde 800.000 anos atrás, as quantidades de CO₂ nunca foram tão altas na atmosfera (ARIAS, Paola A. et al., 2021), pois nunca havia atingido 416 ppm, como se observa hoje (UNEP, 2020). Sabe-se que a ação humana é a grande responsável (ARIAS, Paola A. et al., 2021), tendo em vista o aumento de mais de 100 ppm nas concentrações de CO₂ desde março de 1958 (UNEP, 2020), e assim pode-se atribuir a influência humana às mudanças em um número maior de componentes do sistema climático (ARIAS et al., 2021).

Os estudos dos arquivos naturais e projeções das ações humanas permitem projetar, com confiança média, que até o ano de 2300 as temperaturas globais estejam 2,3°C a 4,6°C

mais elevadas do que em 1850-1900. O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) projetou alguns cenários futuros para a mudança climática terrestre, a projeção (SSP1-1.9), que representa a maior diminuição de emissões futuras, espera que ocorra um aquecimento global menor que 1,5°C até 2100 (ARIAS, Paola A. *et al.*, 2021). Em média, os cenários mais otimistas projetam que a temperatura média da atmosfera terrestre deve aumentar entre 1,5°C a 2°C até 2100 (MASSON-DELMOTTE, Valérie; *et al.*, 2018).

Segundo Pascal Peduzzi, diretor do GRID-Genebra do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e gerente de programas da Sala Mundial de Situação Ambiental, é preciso zerar as emissões líquidas até 2040, para que se mantenha a média de aquecimento global em 1,5°C (UNEP, 2020). Sendo esta a mesma conclusão que o IPCC apresenta em seu Sumário para Formuladores de Políticas do Relatório Mudança Climática 2022: Mitigação da Mudança Climática, no qual, afirma que caso não ocorram reduções significativas imediatas de emissões de gases do efeito estufa em todos os setores, será impossível limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C (UNEP, 2022).

6.2 Fontes Estacionárias Emissoras de CO₂

As principais causas da mudança climática são as fontes emissoras de gases do efeito estufa, sendo um dos principais o CO₂. As fontes de emissão se dividem em duas categorias: móveis e estacionárias.

Entre as fontes móveis pode-se citar como principais representantes os meios de transporte movidos a combustíveis fósseis. Já as fontes estacionárias se caracterizam por ocuparem uma área limitada com possibilidade de avaliação direta na fonte, em geral, ligadas a atividades industriais de transformação, mineração e produção de energia em usinas termelétricas (MMA, 2022).

O CCS (Carbon Capture and Storage) é uma tecnologia recente, que visa a captura, transporte e estocagem de CO₂ gerado por fontes estacionárias, impedindo que este gás do efeito estufa seja liberado para a atmosfera e contribua com o aquecimento global (Global CCS Institute, 2022).

6.3 CCS (Carbon Capture and Storage)

Tendo em vista as metas de redução de emissão de carbono internacionais, como o Acordo de Paris, que visa limitar o aquecimento médio da atmosfera preferencialmente a 1,5°C (UNFCCC, 2015), foi publicado, em resposta, um relatório do IPCC afirmando que para tal é necessário armazenar dezenas de Gt CO₂ por ano (IPCC, 2018). O armazenamento desse CO₂ a longo prazo pode ser realizado através de dois métodos: o

sequestro subterrâneo em formações sedimentares e a mineralização de carbono em rocha basáltica (Kelemen, 2019).

A estocagem de CO₂ subterrânea em formações sedimentares é a técnica mais madura para armazenamento geológico de CO₂ capturado de fontes fixas. A capacidade global de armazenamento subterrâneo em aquíferos salinos e reservatórios de hidrocarbonetos é estimada entre 5.000 e 25.000 Gt CO₂ (Coninck & Benson, 2014), sendo isto mais do que o necessário para limitar o aquecimento a menos de 1,5°C até 2100 (Rogelj *et al.*, 2018).

O CCS é composto por três etapas: captura, transporte e estocagem geológica do CO₂. A primeira etapa é o processo de Captura, no qual é feita a separação do CO₂ de outros gases produzidos em grandes instalações de processos industriais em fontes emissoras fixas, como usinas a carvão e gás natural, siderúrgicas, fábricas de cimento e refinarias. Antes do início do processo de Transporte deve ser feita a compressão do CO₂, que em seguida é transportado por dutos, caminhões ou navios, para o local de armazenamento geológico. Durante o processo de Armazenamento, o CO₂ é injetado em formações rochosas, em profundidades de um quilômetro ou mais (Global CCS Institute, 2022).

Em 1996 ocorreu o primeiro projeto de CCS em escala comercial, o Projeto de Armazenamento do Aquífero Salino Sleipner, realizado em ambiente *offshore* na costa oeste da Noruega. A estocagem de carbono ocorreu em uma formação aquífera salina *offshore*. No processo, a rocha de armazenamento de CO₂ escolhida foi um arenito permeável, encontrada sob uma camada de folhelho, que se comporta como a rocha selante. (Baklid *et al.*, 1996). Este projeto indicou que a técnica de CCS é segura a uma taxa de 1 Mt/ano e ajudou a compreensão da migração da pluma de CO₂ (Kelemen, 2019).

Para o armazenamento geológico é utilizado o CO₂ supercrítico, que apresenta uma densidade em torno de 600 kg/m³ e, neste estado, pode ser injetado e armazenado em formações sedimentares profundas, abaixo de um quilômetro de profundidade. As rochas em que o CO₂ será injetado são chamadas rochas-reservatório, sendo em geral arenitos, calcários, dolomitos, ou suas misturas. Idealmente, elas devem ser espessas e apresentar alta porosidade e permeabilidade para garantir alta capacidade de armazenamento (50–100 MtCO₂/projeto), com injeção comercialmente significativa (MtCO₂/ano). Outra rocha importante para este processo é a rocha selante, que possui baixa permeabilidade e mantém o CO₂ aprisionado na rocha reservatório; em geral são folhelhos, rochas salinas ou carbonáticas de baixa permeabilidade. A segurança do reservatório depende da

impermeabilidade da rocha selante e da extensão dos mecanismos de aprisionamento secundário (Kelemen , 2019).

A porosidade efetiva e o volume da formação podem ser utilizados para estimar a capacidade teórica máxima de armazenamento de CO₂ em qualquer formação rochosa. Existem outros fatores que influenciam na capacidade de armazenamento, como a estrutura geológica, condições do reservatório, taxas de injeção e características de fluxo de fluido, entre outros (Ketzer *et al*, 2015).

6.4 Porosidade

A porosidade (ϕ) é definida como a fração do volume total da rocha ocupada pelos poros (Jorden e Campbell, 1985), sendo descrita pela fórmula:

$$\phi = \frac{\text{volume de poros}}{\text{volume total}} = \frac{\text{volume total} - \text{volume de sólidos minerais}}{\text{volume total}}$$

Além da porosidade total, também é bastante importante a definição da porosidade efetiva, que é a razão entre o espaço vazio interconectado na rocha e o volume total da rocha, uma vez que, se os poros não estiverem interligados, não haverá transporte de fluidos dentro da rocha (Amyx *et al.*, 1960).

Considerando que porosidade (ϕ) de uma rocha é resultado da fração do volume do espaço entre as partículas sólidas da rocha, é fundamental a caracterização dos tipos de poros e das sua origens. A porosidade inicial ou primária é determinada pelo volume de poros de um sedimento quando ele foi depositado e a porosidade secundária pelo volume de poros que é criado por processos diagenéticos (Hook, 2003). A caracterização dos espaços porosos permite a determinação do volume dos poros e dos comportamentos de fluxo de fluido nos reservatórios (Schön, 2014).

Na tabela 1 são sintetizadas definições de alguns termos amplamente usados no estudo da porosidade de rochas sedimentares.

Tabela 1 - Tabela com tipos de porosidade descritos por (Glover, 2001).

Tipo de Porosidade	Definição
Porosidade total	O espaço inclui todos os poros, rachaduras, vugs, espaços inter e intracristalinos
Porosidade conectada ou efetiva	A razão entre o volume do poro conectado e o volume total.
Porosidade primária	A porosidade da rocha resultante de sua deposição original.
Porosidade secundária	A porosidade resultante da diagênese.
Microporosidade	A porosidade reside em poros pequenos comumente associados a argilas detríticas e autigênicas.
Porosidade intergranular	A porosidade devido ao volume de poros entre os grãos de rocha.
Porosidade intragranular	A porosidade devido a vazios dentro dos grãos de rocha.
Porosidade de dissolução	A porosidade resultante da dissolução de grãos de rocha.
Porosidade de fratura	A porosidade resultante de fraturas na rocha em todas as escalas.

Baseada em características físicas e genéticas dos tipos de poros, Shanmugam (1985) associou uma classificação do tipo de poro em arenitos com a distribuição e seus efeitos na qualidade dessa rocha-reservatório, conforme pode ser observado na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Relação entre os tipos de poros em arenitos e sua distribuição e efeitos na qualidade da rocha-reservatório (Shanmugam, 1985).

Tipo de Poro	Distribuição	Efeitos positivos na qualidade do reservatório
---------------------	---------------------	---

Primária Intergranular	comum e isolada	pequeno para grande
Primária Intragranular	muito rara e isolada	muito pequeno
Secundária Intergranular	muito comum e isolado a contínuo	moderado a grande
Secundária Intragranular	raro para comum e isolado	pequeno a moderado
Fraturas de grão	raro para comum e isolado	muito pequeno
Fratura de rocha	raro para comum e pervasivo	moderado a grande

Outra forma de classificação da porosidade voltada à petrofísica está ilustrada na tabela 3, que relaciona os tipos de poros com seus diâmetros (Mann *et al.*, 1997).

Tabela 3 - Relação entre tipos de poros e seus tamanhos (Mann *et al.*, 1997).

Tipo de poro	Diâmetro (d)
Poros grosso	$d > 2 \text{ mm}$
Macrocapilar	$2 \text{ mm} > d > 50 \mu\text{m}$
Capilar	$50 \mu\text{m} > d > 2 \mu\text{m}$
Microcapilar	$2 \mu\text{m} > d$
Macroporo	$d \geq 50 \text{ nm}$
Mesoporo	$50 \text{ nm} \geq d \geq 2 \text{ nm}$
Microporo	$2 \text{ nm} \geq d \geq 0,8 \text{ nm}$
Submicroporo	$0,8 \text{ nm} \geq d$
Ultramicroporo	$\cong 0,6 \text{ nm}$

6.5 Formação Resende

A Formação Resende está inserida em um hemigráben de direção ENE, formado durante o desenvolvimento do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) no Eoceno. Essa unidade litoestratigráfica compreende um preenchimento sedimentar sintectônico gerado por um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados, e compõe as porções basal e lateral do Grupo Taubaté. Ela encerra este tipo de depósito

nas bacias onde está presente, sendo estas as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (Riccomini, 1989).

Riccomini (1989) descreveu, nas quatro bacias, o sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados, e concluiu que foram geradas duas fácies sedimentares principais, informalmente nomeadas pelo autor de fácies A e B. A fácies A compõe a porção proximal do sistema de leques aluviais e contém diamictitos, e orto e paraconglomerados. A fácies B ocupa a porção distal do sistema de leques e é composta por arenitos de coloração esverdeada, lamitos e lamitos arenosos maciços. Durante a formação de tais fácies ocorreram processos de fluxo gravitacional de massa (Fácies A), gerando um possível retrabalhamento fluvial entrelaçado (Fácies B) nas porções distais da planície aluvial (Riccomini *et al*, 2004; Riccomini, 1989).

Anos depois, Ramos (2003) apontou que a Formação Resende pode ser dividida em dois Membros: i) o Membro Itatiaia com depósitos de leques aluviais proximais e médios adjacentes aos maciços do Itatiaia e do Morro Redondo e suas partes distais, e ii) o Membro Acácias formado por drenagem axial da Bacia de Resende, que recebedora das drenagens provenientes dos leques aluviais. O autor identificou três fácies sedimentares, compostas por oito litofácies areníticas nesta formação.

Riccomini (1989) e Sant'Anna (1999) descrevem as porções predominantemente arenosas como resultado de canais fluviais entrelaçados (*braided*) axiais às bacias e se encontram principalmente nas bacias de Resende, Taubaté e São Paulo, onde intercalam-se aos depósitos lamíticos argilosos e argilo-arenosos dos leques aluviais distais da Formação Resende (Riccomini, 1989; Sant'Anna, 1999). Apresentam-se geralmente com estratificação cruzada acanalada de médio porte ou corpos maciços de extensão métrica e espessura decimétrica, com a geometria de canal preservado (Riccomini, 1989).

Ramos (2003) descreveu oito litofácies de arenito na Formação Resende, identificadas como: Ag (arenito gradado), Am1 e Am2 (arenitos maciços), Ah1 e Ah2 (arenitos laminados), At (arenito com estratificações cruzadas acanaladas), Ap (arenito com estratificação cruzada planar), Ar (arenito com laminação cruzada). Segundo Riccomini (1989), Sant'Anna (1999) e Ramos (2003) os arenitos são subarcoseanos a arcoseanos, pontualmente conglomeráticos, de granulação média a grossa, mal selecionados com grãos subarredondados a angulosos, envoltos por uma fina película da matriz argilosa em contatos pontuais, indicando que a matriz provém de infiltração.

A Formação Resende apresenta arenitos de alta porosidade intragranular, pouca matriz argilosa, por vezes são conglomeráticos, e são compostos por grãos de quartzo,

feldspato, mica, esmectita alterada e mineral máfico, com proporções variadas de matriz argilosa esverdeada. As porções arenosas da Formação Resende apresentam glóbulos e lepisferras de sílica e cimentação em conglomerados e lamitos, indicando que ocorreu influência hidrotermal no RCSB (Sant'Anna, 1999; Riccomini *et al*, 2004). Os cimentos surgiram pela ação de falhas e fraturas na formação, e estudos indicam que a cristalização dos cimentos foi penecontemporânea à sedimentação eocênica, permitindo a percolação de soluções hidrotermais e cimentação (Riccomini *et al*, 2004;. Sant'Anna & Riccomini, 2001). O evento de silicificação hidrotermal ocorreu no final da sedimentação da Formação Resende, tendo em vista a atividade sísmica sinsedimentar indicada pelos arenitos dos diques clásticos da Bacia São Paulo (Sant'Anna, 1999).

As principais áreas-fonte dos sedimentos da Formação Resende são o embasamento pré-cambriano e os maciços alcalinos cretáceos, tendo em vista que datações isotópicas dos lamitos da formação (utilizando Sm/Nd no modelo TDM) indicam idades entre 1,7 e 2,2 Ga (idade do embasamento) e 1,3 Ga (idade mista entre os maciços e rochas pré-cambrianas) (Sant'Anna *et al.*, 2003; Riccomini *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2020).

Trabalhos prévios sobre a porosidade de arenitos da Formação Resende foram realizados na Bacia de Resende. Estes arenitos apresentam porosidade predominantemente de origem secundária intragranular, com porosidade total média de 17%, que diminui (< 10%) e aumenta (> 20%), respectivamente, com maior e menor presença de epimatriz de feldspatos alterados (Brêda *et al.*, 2013).

A porosidade dos arenitos varia de acordo com a profundidade em que se encontram. Os arenitos em superfície expostos aos efeitos do intemperismo (relacionado à pluviosidade e percolação de água meteórica, etc) possuem macroporosidade entre 11 e 16% e a porosidade predominantemente é intragranular (Barboza, 2009). Ou seja, a porosidade predominante é a que ocorre dentro dos grãos alterados de feldspato, pois o intemperismo causa maior alteração desse mineral, os transformando em argilominerais, o que eleva a matriz argilosa e diminui a conectividade entre os poros da rocha (Barboza, 2009). Os arenitos em subsuperfície possuem elevada porosidade intergranular (entre 11% e 21%), pois apresentam menor presença de matriz, e alta concentração de feldspatos na rocha (a classificando como arcoseana). Isto faz com que a conectividade entre os poros seja boa, tornando o arenito de maior profundidade um bom reservatório (Barboza, 2009). Também é observada no arenito uma matriz de origem secundária, epimatriz, por vezes avermelhada, impregnada na matriz argilosa, consequência de cimentação parcial de óxidos de ferro (Brêda *et al*, 2013).

6.6 Projetos de CCS Internacionais

Há vários casos internacionais de projetos de CCS, tanto comerciais quanto em desenvolvimento. Para referência, foram selecionados dois projetos, um nos EUA e outro na Austrália, dado seu uso de arenitos fluviais como reservatórios de CO₂.

6.6.1 EUA

O caso do arenito Mount Simon é de grande interesse, sendo este o principal alvo para sequestro geológico de carbono nos Estados Unidos. Localizado na Bacia de Illinois, nordeste dos EUA, o arenito cambriano pode ter mais de 792 m de espessura. O arenito fluvial Mt. Simon varia de um arenito de granulação fina a grossa, a conglomerados mal selecionados com siltitos e lamitos subordinados (Leetarund & Freiburg, 2014).

Os arenitos de granulação mais fina geralmente possuem minerais argilosos mais abundantes, que contêm elementos radioativos. As rochas de granulação mais grossa contêm menos feldspatos e argilominerais (Leetaru & McBride, 2009). Não há intervalos de carbonato observados e o cimento diagenético predominante é composto por quartzo (Leetarund & Freiburg, 2014). A melhor qualidade do reservatório ocorre na porção inferior do arenito Mt Simon com uma porosidade média de 22% e permeabilidade de 200 mD. Intervalos individuais podem ter porosidades de até 28% e permeabilidades de mais de 1000 mD (Leetarund & Freiburg, 2014).

Alguns depósitos podem ser de leques aluviais e de rios entrelaçados, ambos arcoseanos, o que os caracteriza como reservatório para armazenamento de CO₂. Assim, em áreas ao redor do embasamento, nas partes mais espessas do Arenito Mount Simon, existe um bom reservatório-alvo para o sequestro de carbono (Leetarund & Freiburg, 2014).

O mais recente Atlas de Carbono do Departamento de Energia dos Estados Unidos estima que apenas na Bacia de Illinois, o arenito Mt Simon será capaz de armazenar de 11 a 150 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (Leetarund & Freiburg, 2014). Desde 2011, ocorre a injeção contínua de 1.000 toneladas de CO₂ por dia no reservatório de Mt. Simon Inferior.

O topo do Mt. Simon é coberto por 91 m de silito, arenito e folhelho da Formação Eau Claire. Tendo em vista que a Formação Eau Claire é sobrejacente ao arenito Mt Simon, ela servirá como selo primário para o reservatório de sequestro (Leetarund & Freiburg, 2014).

Em Illinois, existem sete projetos de armazenamento de gás natural com reservatórios nos 122 m superiores do arenito Mt. Simon que abastecem a área de Chicago com gás natural. Este projeto demonstra a integridade da vedação, continuidade do reservatório, capacidade do reservatório e capacidade de injeção do arenito Mt Simon (Leetaruand & Freiburg, 2014).

6.6.2 Austrália

Na Austrália, foi perfurado o furo estratigráfico GSWA Harvey 1, como parte do projeto de captura e armazenamento de carbono do South West CO₂ Geosequestration Hub (South West Hub). O objetivo era avaliar o volume de armazenamento, o potencial de injetividade e a capacidade de retenção de dióxido de carbono no sudoeste da Bacia de Perth. Foram observados dois membros, nove litofácies de ambientes deposicionais fluviais presentes em seis intervalos do Arenito Triássico Lesueur (Olierook *et al.*, 2013).

O Membro Yalgorup é heterogêneo o suficiente para que fosse subdividido em dois, superior e inferior. A porção superior contém preenchimento de canal fluvial com alta porosidade e permeabilidade intercalados com depósitos pantanosos de litologias pelíticas de baixa permeabilidade, que indicam potencial limitado de vedação devido a pela presença de diques de arenito no membro. As permeabilidades apresentadas pelo Membro Inferior Yalgorup são consideradas adequadas para atividade de CCS. Os valores de alta porosidade e permeabilidade variam, dadas às feições de arenito permeável intercalado em argilitos arenosos de baixa permeabilidade, indicando limitações na vedação vertical, mas ainda sendo adequados para armazenamento. A distribuição de minerais e sua reação com CO₂ e salmoura podem produzir minerais argilosos, gerando oclusão de poros, reduzindo porosidade e permeabilidade, mas podem auxiliar na capacidade de vedação de migração vertical, assim como a distribuição de argilas em expansão (Olierook *et al.*, 2013).

O Membro Wonnerup consiste principalmente em preenchimentos de canais fluviais de alta energia e formas de barra, com grandes poros primários devido ao crescimento limitado de cimentos de quartzo e limitados poros obstruídos por caulinita. O Membro também exhibe arenito de porosidade moderadamente alta (10 a 20%) e alta permeabilidade (1 a 700 mD), propriedades equivalentes a projetos de injeção de CO₂ bem-sucedidos. O Membro Wonnerup mineralogicamente se apresenta adequado para o armazenamento, devido à baixa abundância de fases reativas com CO₂ e salmoura, como plagioclásio, K-feldspato, biotita e piroxênio. Tendo em vista que propriedades de dissolução do ácido carbônico possam aumentar a capacidade de contenção de CO₂. O feldspato potássico é o único mineral que provavelmente reagirá com o CO₂ a uma taxa apreciável, entretanto o

aumento na capacidade de contenção ocorrerá em uma taxa muito lenta. Assim é possível dizer que o Membro Wonnerup possui bom potencial de reservatório para armazenamento de CO₂, tendo em vista sua mineralogia estável, fácies de alta porosidade e permeabilidade, e suas profundidades relevantes (>1500 m) são adequados (Olierook *et al.*, 2013).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item será descrito como cada atividade foi executada e com qual objetivo para o desenvolvimento desse Trabalho de Formatura.

7.1 Levantamento Bibliográfico

Neste trabalho foi realizada pesquisa bibliográfica em sítios eletrônicos, livros, artigos, teses e dissertações para obtenção de dados gerais e específicos relacionados ao tema do Trabalho de Formatura. As informações levantadas e sistematizadas serviram para o conhecimento de aspectos gerais e específicos relacionados à origem e medição da porosidade do arenito fluvial da Formação Resende, bem como análise e interpretação dos resultados obtidos nessa pesquisa.

7.2 Mapas e Georreferenciamento

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi elaborado mapa de localização das fontes estacionárias de emissão de CO₂ na região sudeste do Brasil com distância máxima de 150 km da Bacia de Taubaté, adotando-se a cidade de Taubaté como referência. Para essa tarefa, foi utilizado a plataforma *Google Earth Pro*. Os shapefiles dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro foram adquiridos do IBGE, e os shapefiles das bacias sedimentares foram retirados de https://forest-gis.com/shapefiles/bacias_sedimentares_brasileiras.kmz. Em seguida os KMZ foram colocados no programa *ArcGis*, georreferenciados e em seguida foi gerado o mapa com legenda e escala (Anexo 1).

A elaboração dos mapas geológicos das bacias de estudo foi realizada inicialmente por Riccomini (1989), os quais foram digitalizados e alterados por Sant'Anna (1999). Para este trabalho foi feito o georreferenciamento dos mapas das bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, usando a plataforma *Google Earth Pro* e o software *VectorWork*. A partir do georreferenciamento dos mapas geológicos das bacias, eles foram utilizados para a seleção dos melhores locais para coleta de novas amostras em trabalhos de campo nas bacias de Resende e Volta Redonda realizados pela discente. Também é importante

pontuar que no mapa em anexo (Anexo 1) estão indicados afloramentos descritos em trabalhos de campo realizados anteriormente pela orientadora, nos quais foram coletadas amostras da Formação Resende nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda.

7.2.1 Vectorworks

No programa *Vectorworks*, foi acessado o ícone “*File*”, “*Import*”, “*Import DXF-DWG*”, “*Choose Files*”, então foi escolhido o arquivo “*Shape_Bacias_Coreo.dwg*”, para selecionar o mapa geológico. Em seguida, selecionou-se o ícone “*GIS Stake Tools*” para inserir os pontos georreferenciados em locais de referência do mapa (normalmente na confluência de rios).

Em seguida, foi preciso selecionar o mapa e no ícone “*Modify*”, “*Scale Objects*” para ajustar a escala do mapa fornecido ao mapa Geoimage do *Vectorworks*. Então, em “*Attributes*” foram alterados os símbolos de cada litologia, para padronização das cores, deixando apenas a Formação Resende em destaque na cor verde (Anexo 1). Foram acrescentados também os pontos de coleta das amostras georreferenciadas no ícone “*GIS Stake Tools*”.

Por fim, foram removidas informações que não eram relevantes, foram modificados os textos e legendas nas ferramentas de seleção e edição de texto, e foram elaboradas as margens na ferramenta de execução de linhas.

7.3 Levantamento de campo

Ao longo do desenvolvimento do Trabalho de Formatura a discente realizou levantamento de campo em afloramentos de fácies predominantemente arenosas da Formação Resende, presentes nas bacias de Resende e Volta Redonda, para obtenção de dados geológicos e coleta de amostras. As informações levantadas e sistematizadas serviram para conhecimento de aspectos gerais e específicos relacionados aos arenito fluvial da Formação Resende, bem como análise e interpretação dos resultados obtidos nessa pesquisa. No total, foram descritos dez afloramentos e coletadas 21 amostras. Em cada afloramento, foram identificadas e fotografadas as principais fácies sedimentares, e medidas a espessura e continuidade lateral das camadas.

7.4 Descrição macroscópica de amostras

No total, 34 amostras estiveram disponíveis para descrição macroscópica, contando as 21 amostras coletadas pela aluna em levantamento de campo nas bacias de Resende e Volta Redonda durante este Trabalho de Formatura e as 13 amostras obtidas anteriormente

pela orientadora nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda. Todas as amostras foram descritas macroscopicamente em laboratório quanto à suas litologias e cores, e fotografadas para ilustração deste texto. As cores das amostras foram descritas por comparação visual com as cartas de cores de solos de Munsell® Soil Color Charts 2000, após secagem das amostras em temperatura ambiente no laboratório. A classificação litológica das amostras foi efetuada de acordo com Ramos 2003, Miall 2006, Ghazi & Mountney 2009, e Fambrini *et al.* 2017.

7.5 Análise da Porosidade

A análise da porosidade de litologias predominantemente arenosas da Formação Resende foi realizada por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e tratamento de imagens obtidas por MEV pelo *software ImageJ*.

A análise realizada por microscopia óptica (MO) foi empregada em seção delgada de 17 amostras arenosas selecionadas para impregnação da porosidade com corante azul de Orasol para melhor identificação dos poros. Essa análise forneceu os resultados da porcentagem de porosidade em cada amostra, a partir da contagem de 300 elementos, incluindo grãos e poros.

Os resultados de MEV foram obtidos anteriormente pela orientadora em 8 amostras e estavam disponíveis para a análise da porosidade pelo *software ImageJ*.

7.5.1 Software ImageJ

A porosidade foi analisada nas imagens microscópicas obtidas via MEV utilizando o *software* livre *ImageJ (Image Processing and Analysis in Java)* (Rasband 2012), disponível em <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>.

O cálculo da porosidade foi efetuado através do manuseio de imagens obtidas em MEV no programa *ImageJ*. No programa, para as imagens de MEV em tons de cinza foram transformadas em imagens preto e branco, clicando-se em "*Image*", "*Type*" e selecionando a opção "*8-bit*". Em seguida, selecionou-se a porção de interesse da imagem, sendo selecionada toda a imagem de MEV na análise da porosidade intergranular, e apenas o grão em caso de análise da porosidade intragranular.

Em seguida, coloriu-se toda a porção que foi considerada poro de uma cor (por análise de coloração de pixel). Para isso foram usadas as funções "*Image*", depois em "*Adjust*" e selecionada a opção "*Threshold...*" ou "*Ctrl+Shift+T*", então colocou-se a primeira barra no "*0*" e a segunda foi ajustada até que colorisse de toda a porção considerada poro

da imagem. Então manteve-se as opções “*Dark background*”, “*Don’t reset range*” e “*Stack histogram*” desmarcada; selecionou-se a opção “*Default*”; e alterada a opção “*Red*” por “*B&W*”, então toda a porção porosa ficará preta e a porção não porosa branca.

Por fim é feito o cálculo da porcentagem de poros que há na amostra, através do cálculo da porcentagem de pixels pretos na imagem, usando a função “*Analyze*”, em seguida em “*Analyze Particles...*”. Em “*Analyze Particles*” deixou-se “*Size (pixel²): 0-Infinity*”, “*Circularity: 0.00-1.00*” e “*Show: Nothing*”; então selecionada apenas as opções “*Display results*” e “*Summarize*”; e clicou-se em “*OK*”. Então o *software* gera uma planilha com uma coluna denominada “*%Area*”, e nela estará indicada a porcentagem de pixels pretos que a área selecionada possui, indicando neste caso, a porosidade em porcentagem.

8. RESULTADOS OBTIDOS

Nesse item serão descritos os resultados obtidos em cada atividade realizada.

8.1 Levantamento de fontes emissoras fixas de CO₂

Idealmente, os sítios de armazenamento de CO₂ devem estar localizados em um ambiente geológico estável, e as fontes emissoras devem estar próximas dos potenciais sumidouros (local de armazenamento) tendo em vista que se estes forem muito distantes a atividade será economicamente inviável, dado o alto custo de transporte (Bachu, 2010).

Apenas em 2018, a região sudeste do Brasil emitiu 396,2 milhões de toneladas brutas de gás carbônico equivalente (CO₂e) na atmosfera, correspondente a 20% do total nacional (IEMA, 2021). Por mais que em grandes áreas metropolitanas, a principal fonte de emissão de GEE seja móvel e ligada aos meios de transporte, as fontes estacionárias (fixas) possuem grande participação nas emissões da região, principalmente com as usinas termelétricas fósseis (IEMA, 2021).

A figura 3 apresenta o mapa regional da área de estudo, com a localização de fontes emissoras fixas de CO₂ na região sudeste do Brasil, onde há expressiva ocorrência dos arenitos da Formação Resende, dentro do raio de 150 km a partir da cidade de Taubaté, considerando a cidade como ponto central da Bacia de Taubaté. Essas fontes foram compiladas a partir da plataforma *Google Maps*. Nota-se que há diversidade nos tipos de fontes fixas, que incluem usinas termelétricas, siderúrgicas, refinarias e cimenteiras, as quais estão localizadas principalmente na região oeste da Bacia de São Paulo. No mapa (Fig. 3), estão localizadas 22 cimenteiras, 24 refinarias, 30 siderúrgicas, e 22 usinas

termelétricas, que poderiam se beneficiar da implantação da tecnologia CCS em uma bacia sedimentar na região.

Considerando todas as características apresentadas da Formação Resende e das bacias em que se encontra, bem como os critérios para avaliar e classificar bacias sedimentares em termos de sua adequação para o armazenamento geológico de CO₂ (Bachu, 2010), avalia-se que os arenitos da Formação Resende se tornam o principal alvo de estudo para estocagem de CO₂ para as fontes estacionárias desta porção do sudeste do Brasil, pois situam-se próximos às fontes e em posição intermediária entre as bacias do Paraná e de Santos.

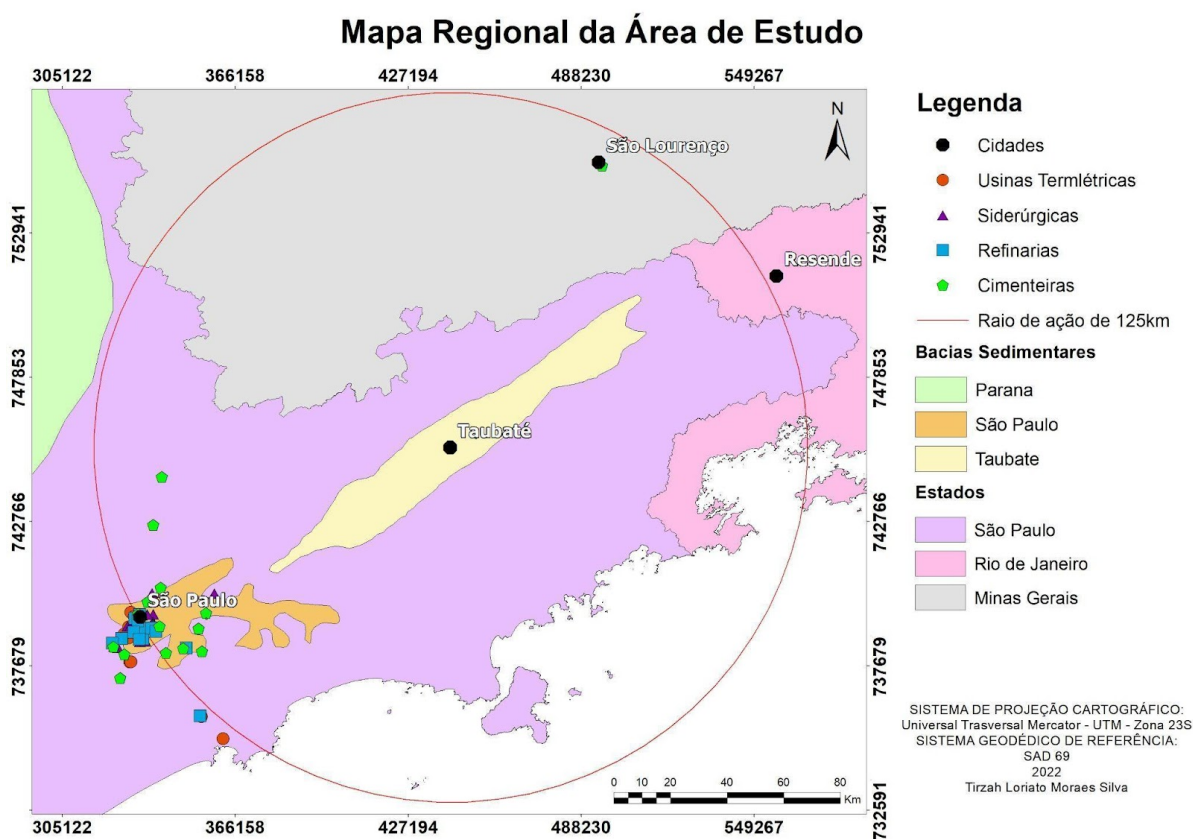


Figura 3: Fontes emissoras fixas de CO₂ localizadas dentro do raio de 150 km a partir da cidade de Taubaté, ponto central da Bacia de Taubaté, onde há expressiva ocorrência de arenitos da Formação Resende.

8.2 Levantamento de campo e coleta de amostras

Na seção-tipo da Formação Resende, exposta na porção central da bacia homônima (afloramento RE-10, Anexo 1) estão bem caracterizadas as fácies de arenitos fluviais da formação. Essa seção está ilustrada nas imagens da figura 4 e foi originalmente descrita por Melo *et al.* (1985). Os autores descreveram a fácies fluvial da Formação Resende como depósitos fangomeráticos.

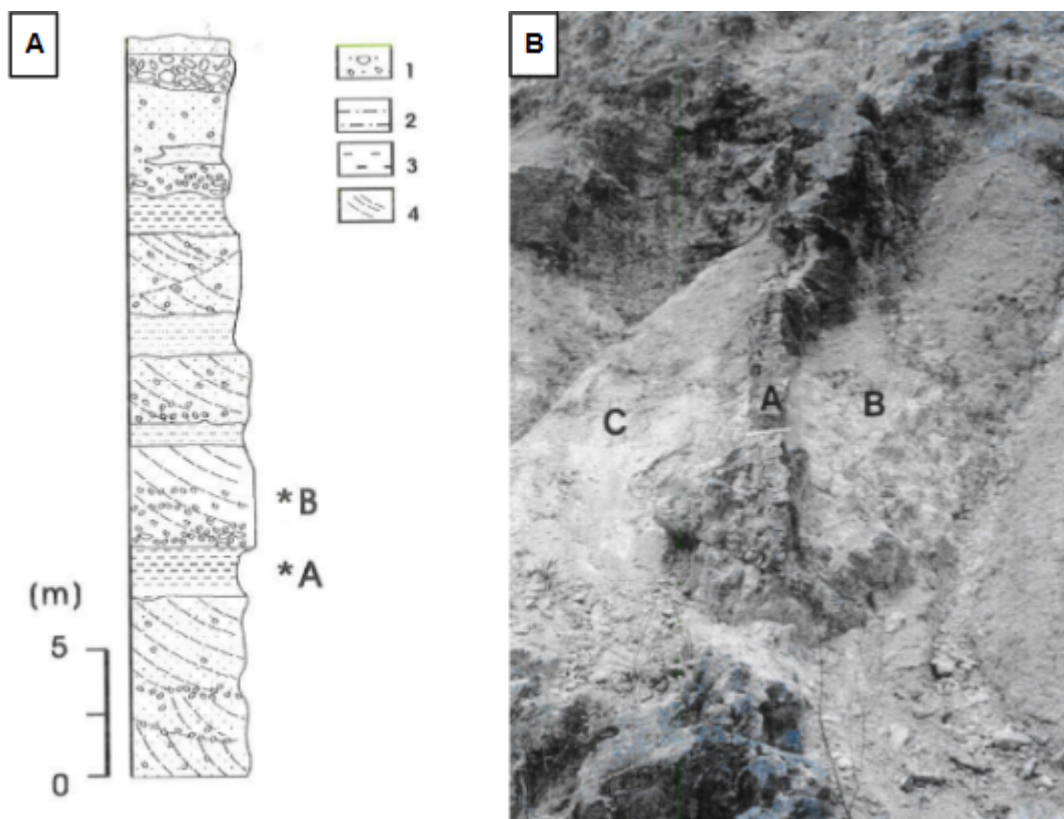


Figura 4: (A): Seção-tipo da Formação Resende (Melo *et al.* 1985), exibindo conglomerado (1), pelito argiloso laminado (2), pelito laminado (3) e arenito com estratificação cruzada acanalada (4). (B): Foto da base da exposição amostrada na borda oeste da Bacia de São Paulo, (local BSP-51), exibindo dique clástico de arenito (A) e lamito argilo-arenoso (B e C) (Sant'Anna, 1999).

Além de amostras já coletadas previamente pela orientadora nessa seção tipo e em outros afloramentos da formação, nesse Trabalho de Formatura também foram descritos e amostrados pela discente dez novas exposições para observação das características dos depósitos da Formação Resende nas bacias de Resende e Volta Redonda. A totalidade dos afloramentos e amostras utilizados nesse Trabalho de Formatura estão listados na tabela 4. O mapa geológico das bacias em estudo com o local dos afloramentos está no Anexo 1.

O primeiro trabalho de campo realizado pela discente desta pesquisa ocorreu no dia 02 de agosto de 2022. Nele foram realizadas observações, medições e amostragens. Foram descritos 7 afloramentos, denominados RET-01, RET-02, RET-03, RET-04, RET-05, RET-06 e RET-07. O afloramento RET-07 foi o de maior interesse para esse trabalho. Durante o trabalho de campo também foram coletadas 10 amostras, das quais quatro foram preparadas para microscopia óptica.

O segundo trabalho de campo realizado pela discente desta pesquisa ocorreu nos dias 18, 19 e 20 de agosto de 2022. Nele foram realizadas observações, medições e amostragens. O afloramento RET-07 foi revisitado e foram descritos 3 afloramentos novos denominados RET-08, VRT-01 e VRT-02. Durante este trabalho de campo também foram coletadas 17 amostras.

Um total de 34 amostras da Fm. Resende estavam disponíveis para o estudo.

Tabela 4 - Informações sobre as bacias sedimentares, locais, coordenadas e códigos das amostras coletadas para o Trabalho de Formatura. Locais indicados com asterisco(*) foram descritos e amostrados pela discente nesse Trabalho de Formatura.

Bacia Sedimentar	Local	Coordenada	Amostras
São Paulo	Luz	23°32'6.86"S, 46°38'7.10"O	LUZ
	BSP-51	23°33'43.67"S, 46°45'25.13"O	BSP-51-3A
			BSP-51-3B
Taubaté	QZ-19	22°34'3.42"S, 44°59'48.98"O	QZ-19-B
	TB-48	23°17'21.41"S, 46°02'59.12"O	TB-48-A
	TB-50	23°23'25.34"S, 48°10'44.47"O	TB-50-B
			TB-50-G
Resende	CF-45	22°33'39.98"S, 44°16'48.51"O	CF-45-D2
	RE-10	22°27'35.27"S, 44°27'47.10"O	RE-10-B
	RE-11	22°28'52.24"S, 44°34'32.85"O	RE-11-B

	RE-40	22°26'12.42"S, 44°23'27.36"O	RE-40-B
			RE40-E
	RET-07(*)	22°27'35.78"S, 44°28'5.13"O	RET-07-A1
			RET-07-A2
			RET-07-B1
			RET-07-B2
			RET-07-C
			RET-07-D Topo
			RET-07-D Central
			RET-07-D Basal
	RET-08(*)	22°27'18"S, 44°19'37"O	RET-08.1-A1
			RET-08.1-D
			RET-08.1-BAD
			RET-08.1-A2
			RET-08.2-A1 Topo
			RET-08.2-A1 Central
			RET-08.2-A1 Basal
			RET-08.2-B1
			RET-08.2-AB
			RET-08.2-D
RET-08.2-A2			
Volta Redonda	CP-01	22°32'16.64"S, 44°04'20.16"O	CP-01-A
	VRT-01(*)	22°32'14"S, 44°04'35"O	VRT-01
	VRT-02(*)	22°31'12"S, 44°03'01"O	VRT-02

8.3 Fácies sedimentares da Formação Resende nas bacias de Resende e Volta Redonda

A seguir serão apresentadas as características principais das fácies sedimentares observadas em cada afloramento analisado nas bacias de Resende e Volta Redonda, e indicadas as amostras coletadas na Fm. Resende.

Nos afloramentos a discente descreveu quatro fácies sedimentares: (A) Fácies Arenito com variação de matriz argilosa ao longo do afloramento; (B) Fácies Arenito conglomerático; (B*) Fácies Conglomerado lamoso; (C) Fácies lamito cimentado; (D) Fácies lamito.

- Afloramento RET-07:

O afloramento RET-07 situa-se em corte de estrada na Av. Duque de Caxias, 675. O afloramento apresenta 9 m de extensão lateral e 4 m de altura. As fácies observadas estão indicadas nas figuras 6 a 8, e as amostras coletadas na figura 9.

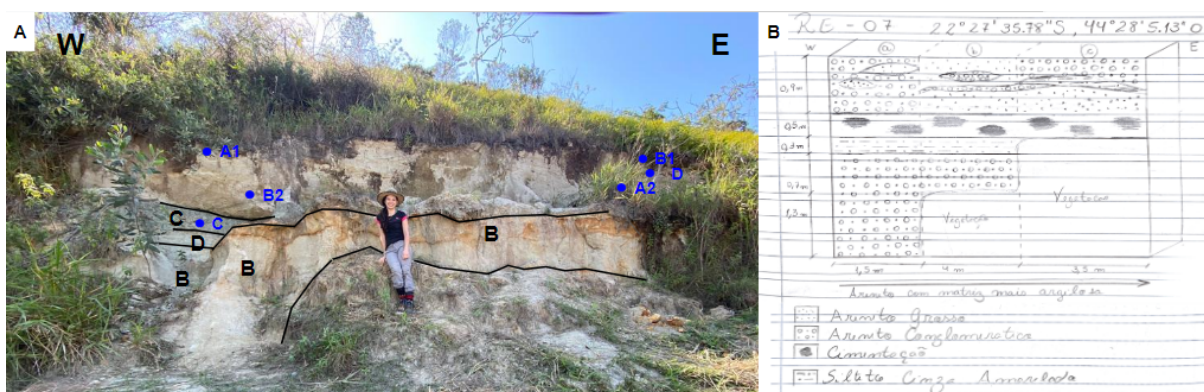


Figura 5: A: Acima, foto captando todas as porções do afloramento RET-07. Na figura também é possível indicar as fácies observadas: fácies B, C e D. Importante pontuar que a porção leste do afloramento está coberta por vegetação na porção superior direita da imagem. B: Ao lado, croqui com visão geral do afloramento.

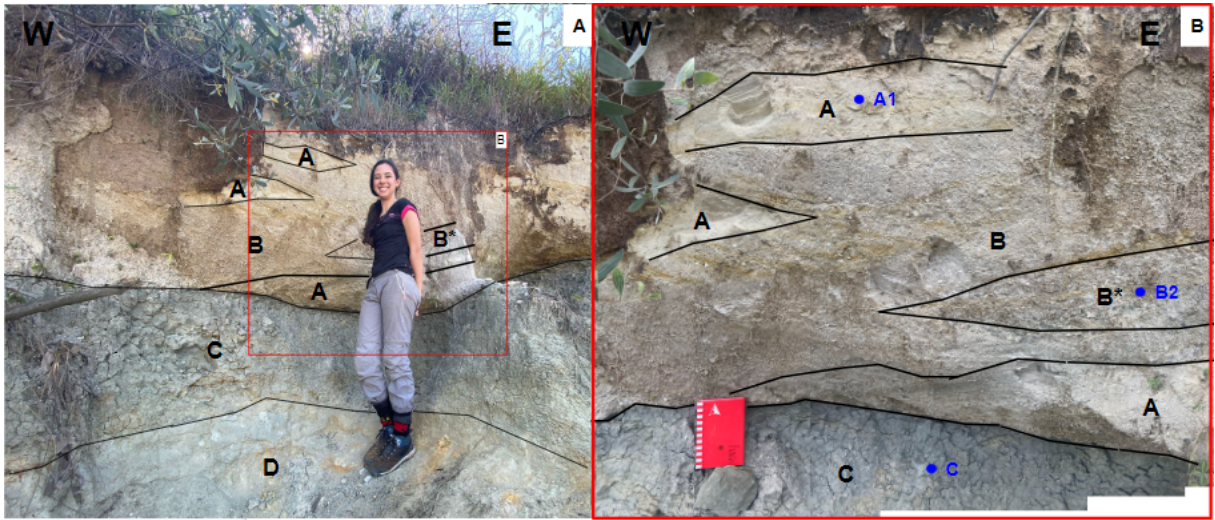


Figura 6: Fotos da porção oeste do afloramento RET-07, à beira da Av. Duque de Caxias. A: exposição da (D) Fácies lamito na porção basal cinza clara (30 cm), (C) Fácies lamito cimentado cinza na porção acima (50 cm), e aproximadamente 90cm de intercalações entre lentes da (B) Fácies arenitos conglomerático, (B*) Fácies conglomerado lamoso e (A) da Fácies arenito na porção amarelada superior. B: porção da imagem A com maior detalhe, apresentando a (B) Facie arenito conglomerático com uma lente de (B*) Fácies conglomerado lamoso de 26 cm de espessura e três lentes (A) Fácies arenito com espessura de 15 a 6 cm.

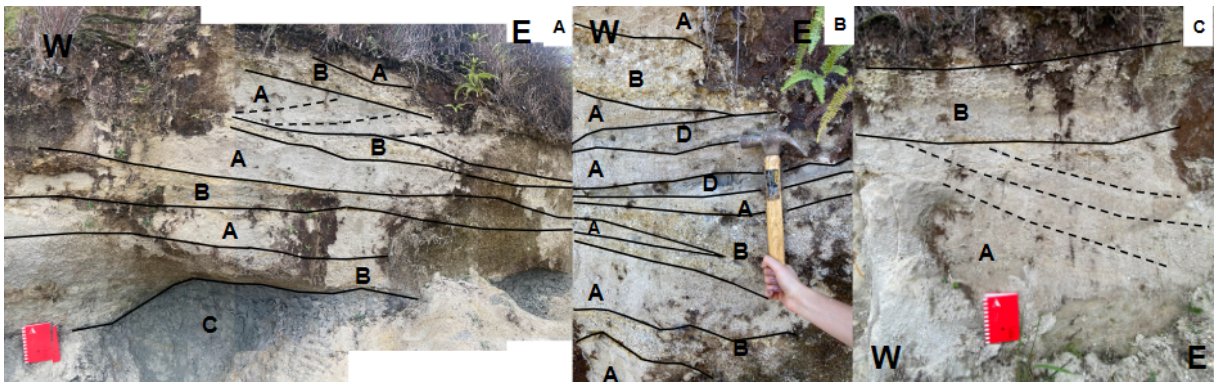


Figura 7: Fotos da porção central do afloramento RET-07, à beira da Av. Duque de Caxias. A: exposição da (C) Fácies lamito cimentado cinza na porção acima (12 cm de espessura), seguida por (B) Fácies arenito conglomerático (18 cm), (A) da Fácies arenito médio (29 cm), (B) Fácies arenito conglomerático (11 cm), (A) da Fácies arenito médio (18 cm), (B*) Fácies conglomerado lamoso (16 cm), (A) da Fácies arenito com estrutura cruzada acanalada de (21 cm), (B*) Fácies conglomerado lamoso (12 cm), e por fim (A) da Fácies arenito (10 cm). B: exposição de lentes centimétricas intercaladas da porção basal para superior, de (A) arenito (12 cm), para (B) arenito conglomerático (até 13 cm), para (A) arenito (20 cm), para (B) arenito conglomerático (até 22 cm) com lente de (A) arenito (5 cm), para (A) arenito (5 cm), para (D) lamito (5 cm), para (A) arenito (10 cm), para (D) lamito (até 10 cm), para (A) arenito médio (até 10 cm), para (B) arenito conglomerático (15 cm), para (A) arenito. C: exposição de estratificação cruzada acanalada com intercalação de (B) arenito conglomerático intercalando-se ao (A) arenito.

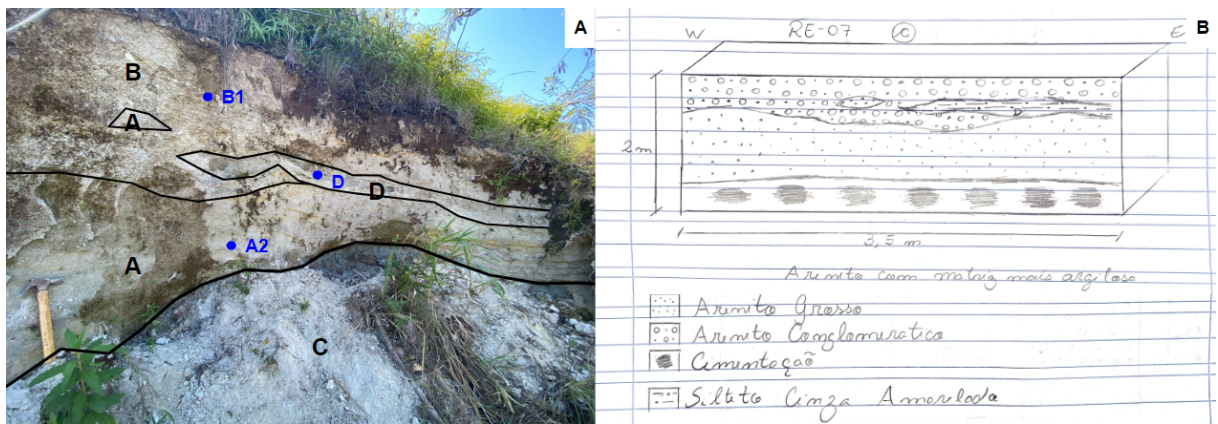


Figura 8: A: Foto da porção leste do afloramento RET-07, à beira da Av. Duque de Caxias. Na porção basal há (C) lamito cimentado em nível tabular de 50 cm, sobre ela uma porção tabular de 35 cm composta pelo (A) arenito lamoso, sobreposto por uma lente de 20 cm de (D) lamito, rodeada a norte e oeste por (B) arenito conglomerático com espessura de 80 cm, e acima há lente centimétrica do (A) arenito lamoso. B: Croqui de maior detalhe da porção leste do afloramento RET-07.

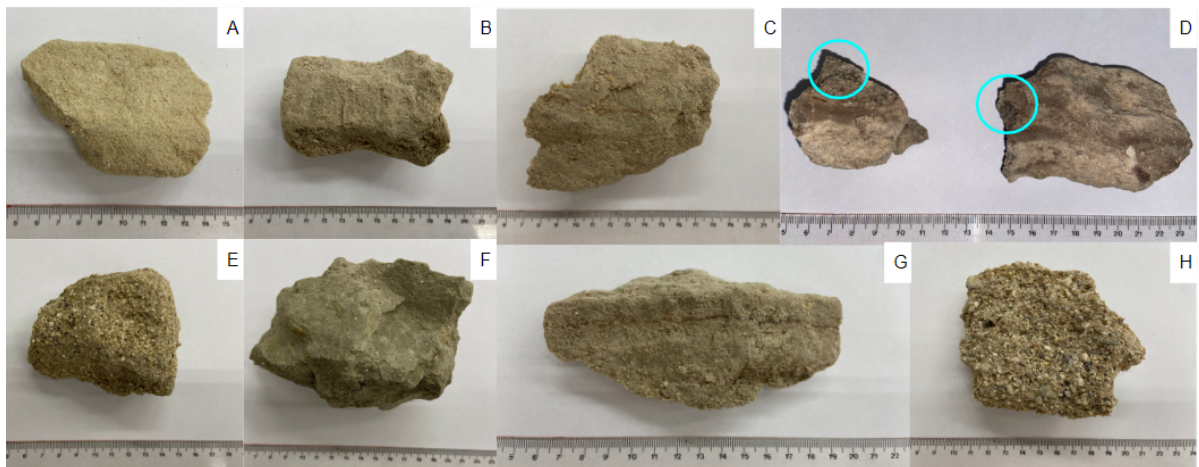


Figura 9: Fotos das amostras do afloramento RET-07, à beira da Av. Duque de Caxias. A: Amostra RET-07A1, arenito bem selecionado. B: Amostra RET-07A2, arenito lamoso. C: Amostra RET-07D Topo, lamito com lâminas de conglomerado. D: Amostra RET-07D Central, lamito com lâminas de lamito com fósseis de vegetação nos círculos azuis. E: Amostra RET-07B arenito conglomerático. F: Amostra RET-07C lamito. G: Amostra RET-07D basal, lamito. H: Amostra RET-07B2 conglomerado lamoso.

- Afloramento RET-08.1:

Afloramento RET-08.1, onde ocorre arenito, arenito conglomerático e silito em frente de pedreira abandonada, com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende, na entrada do quilômetro 293 da Rodovia Presidente Dutra (RJ-116) para o Município de Porto Real (RJ). As fácies estão indicadas na figura 10, e as amostras coletadas na figura 11.

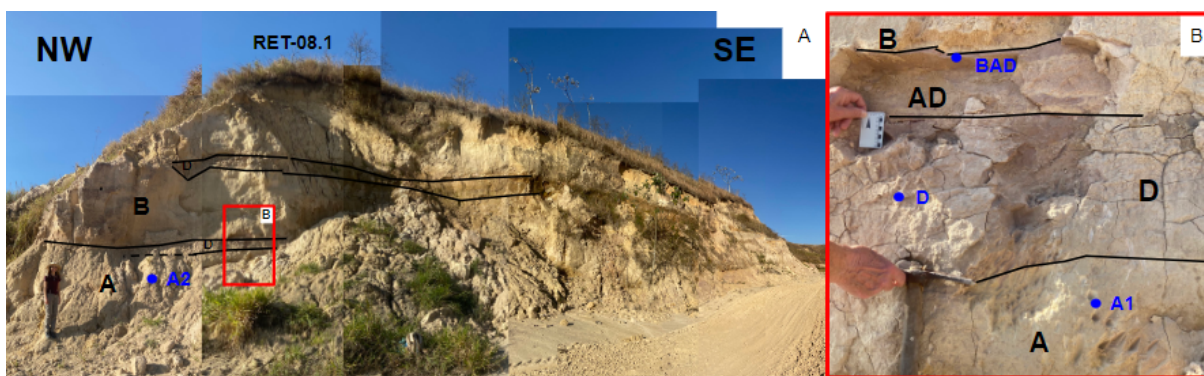


Figura 10: Fotos do afloramento RET-08.1, em pedreira abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende. A: afloramento com 3,5 m de altura e 40 m de largura, com exposição das fácies (A) arenito (1,7 m), sobreposto por (D) lamito (53 cm), (B) arenito conglomerático (75 cm), e (D) lamito. B: foto de detalhe de porção da imagem (A), com exposição da fácies (B) arenito conglomerático, das fácies (D) lamito e (A) arenito intercaladas (18 cm), (D) lamito (35 cm), e (A) arenito (30 cm).



Figura 11: Fotos das amostras do afloramento RET-08.1, em pedreira abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende. A: Amostra RET-08.1-A1, arenito lamoso. B: Amostra RET-08.1-BAD, com as fácies (B) arenito conglomerático, (A) arenito, e (D) lamito. C: RET-08.1-D, com fácies (D) lamito. D: RET-08.1-A2, arenito lamoso da porção basal do afloramento.

- Afloramento RET-08.2:

Afloramento RET-08.2, apresentando arenito, arenito conglomerático, conglomerado (B*) e siltito em frente de pedra abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende, na entrada do quilômetro 293 da Rodovia Presidente Dutra (RJ-116) para o Município de Porto Real (RJ). As fácies estão indicadas nas figuras 12 a 13, e as amostras coletadas na figura 14.

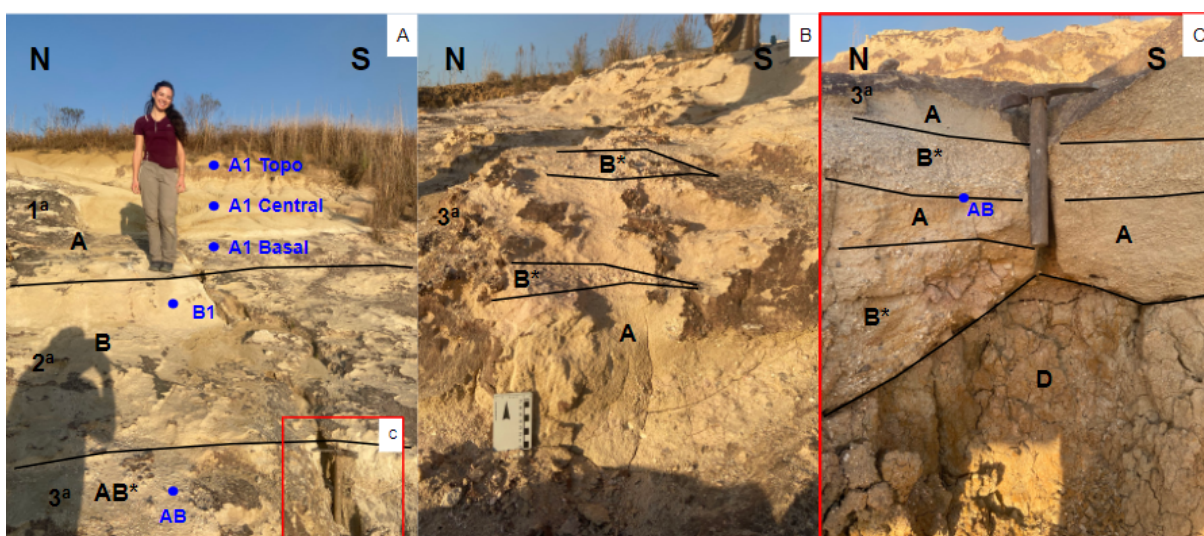


Figura 12: Fotos do afloramento RET-08.2, em pedra abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende. A: porção superior do afloramento, com exposição das três primeiras fácies, (A) arenito bem selecionado, (B) arenito conglomerático, e (A) arenito bem selecionado com lentes de (B*) conglomerado. B: foto de detalhe de porção da imagem A, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado com lentes de até 3 cm de (B*) conglomerado. C: foto de detalhe de porção da imagem A, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado com lentes de até 30 cm de (B*) conglomerado.

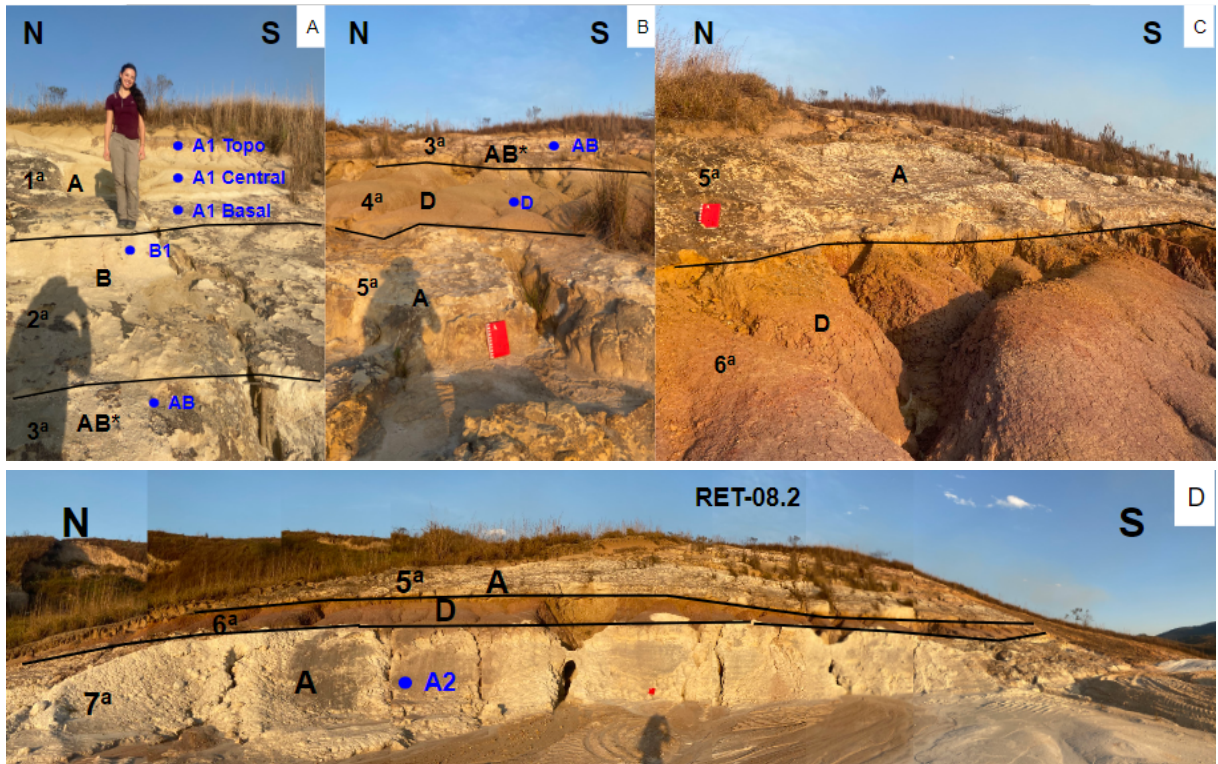


Figura 13: Fotos do afloramento RET-08.2, com 11 m de altura e 50 m de largura, em pedra abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende. A: porção superior do afloramento, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado (1,7 m), (B) arenito conglomerático (30 cm), e (A) arenito bem selecionado com lentes de (B*) conglomerado. B: foto da porção central do afloramento, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado com lentes de (B*) conglomerado (40 cm), (D) lamito (2 m), e (A) arenito bem selecionado (2,2 m), nas camadas numeradas 3ª, 4ª e 5ª. C: foto da porção central do afloramento, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado (2,2 m), (D) lamito (1 m), nas camadas 5ª e 6ª. D: foto de toda porção basal do afloramento, com exposição das fácies (A) arenito bem selecionado (2,2 m), (D) lamito (1 m) e (A) arenito bem selecionado branco (2,5 m), nas camadas 5ª, 6ª e 7ª.

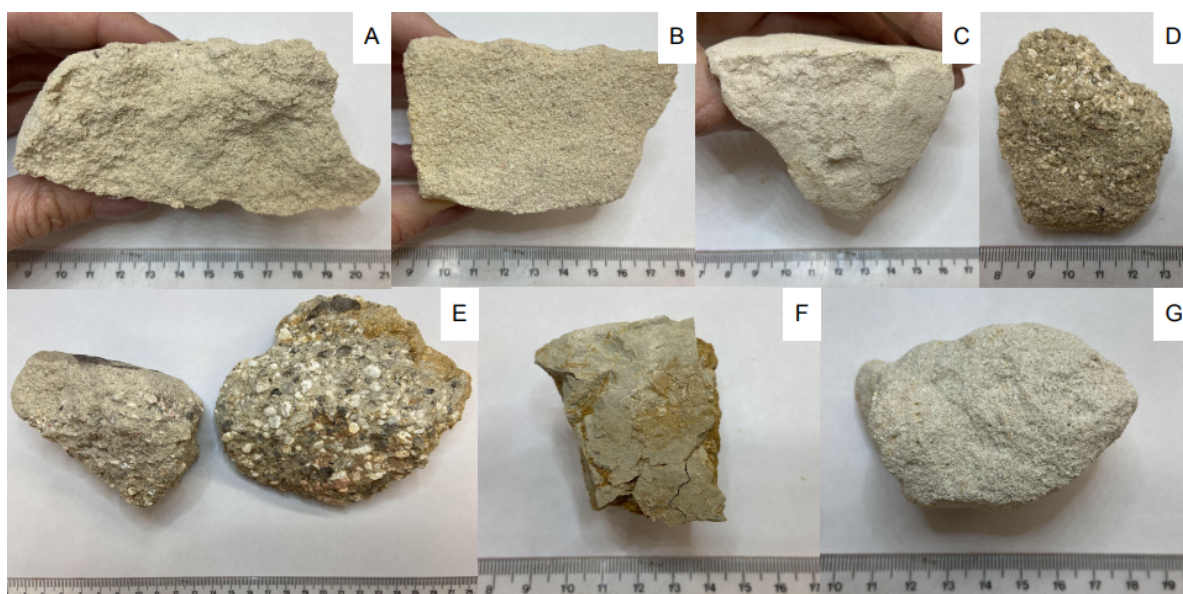


Figura 14: Fotos das amostras do afloramento RET-08.2, em pedra abandonada com acesso pela Estrada dos Bulhões Resende. A: Amostra RET-08.2-A1 Basal, arenito lamoso. B: Amostra RET-08.2-A1 Central, arenito lamoso. C: RE-08.2-A1 Topo, arenito médio. D: RET-08.2-B1, (A) arenito lamoso com lâminas de (B) arenito conglomerático e (B*) conglomerado. E: RET-08.2-AB (A) arenito com lâminas de (B*) conglomerado. F: RET-08.2-D, (D) lamito. G: RET-08.2-A2, (A) arenito lamoso.

- Afloramento VRT-01:

Afloramento VR-T01, contendo arenito, arenito conglomerático, conglomerado e rocha vulcânica ultrabásicas alcalinas (Riccomini, 1989) em corte de estrada na Rodovia dos Metalúrgicos, 8300, logo após acesso para a Escola Municipal Prof. Maria Rosa Rodrigues, em frente ao posto Shell. As fácies e as amostras coletadas estão indicadas na figura 15.

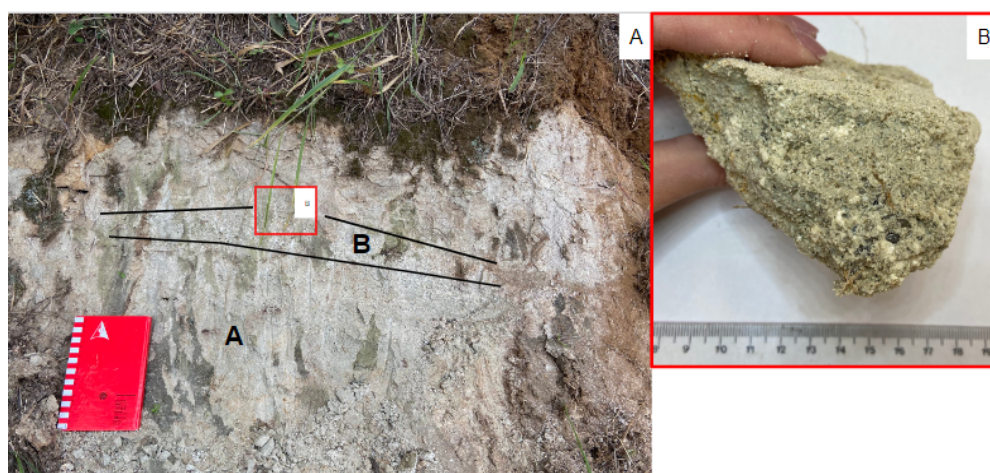


Figura 15: A: Foto do afloramento VRT-01, com 2 m de altura e 10 m de largura, em corte de estrada na Rodovia dos Metalúrgicos, 8300; com exposição das fácies (A) arenito com lente de 10 cm de (B) conglomerado. B: Foto da amostra retirada do afloramento RET-08.2, onde está indicado na imagem A, a amostra apresenta arenito com lâminas de (B) conglomerado.

- Afloramento VRT-02:

Afloramento VR-T02, contendo arenito, arenito conglomerático, conglomerado, em corte de estrada na Rodovia do Contorno, quilômetro 4, após o n° 3301 - Jardim Mariana, Volta Redonda - RJ. As fácies estão indicadas nas figuras 16 a 17, e a amostra coletada na figura 17.



Figura 16: Fotos do afloramento VRT-02, com 4 m de altura e 23 m de largura, em corte de estrada na Rodovia do Contorno, quilômetro 4. A: foto de todo afloramento com exposição das fácies (A) arenito lamoso com lentes de (B) arenito conglomerático e (B*) conglomerado, em estrutura cruzada acanalada de 42 cm e 64 cm, seguidos abaixo por linha de (B*) conglomerado (12cm), (A) arenito lamoso com (B) arenito conglomerático (1 m), outras linhas de (B*) conglomerado seguido de (A) arenito lamoso com (B) arenito conglomerático (1,8 m). B: foto de detalhe de porção da imagem B, com exposição das fácies (A) arenito lamoso, (B) arenito conglomerático e (B*) conglomerado em duas estruturas cruzadas acanaladas de 42 cm e 64 cm.

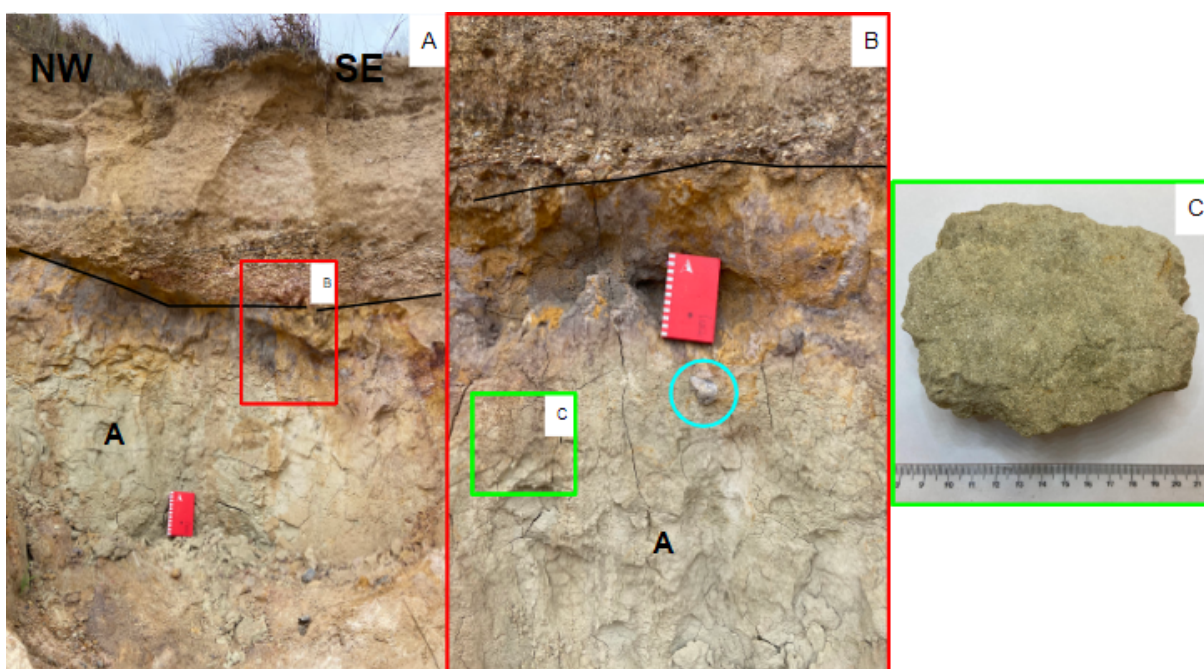


Figura 17: Fotos do afloramento VRT-02, com 4 m de altura e 23 m de largura, em corte de estrada na Rodovia do Contorno, quilômetro 4. A: foto da porção noroeste do afloramento com exposição de depósito quaternário sobre a Formação Resende (90 cm), na qual se observa fácies (A) arenito lamoso. B: foto de detalhe de porção da imagem A, com exposição da fácies (A) arenito lamoso com alguns calhau de até 7 cm indicado no círculo azul. C: imagem da amostra de fácies (A) arenito lamoso, retirada na área indicada em verde na imagem B.

8.4 Características principais das fácies e amostras analisadas

A partir dos levantamentos de campo e dados prévios disponíveis para a Formação Resende, as litologias analisadas em laboratório receberam classificação mais elaborada, tendo sido observados: lamito, lamito com lentes de arenito, arenito médio, arenito fino, arenito lamoso, arenito conglomerático, arenito com lâminas de conglomerado, arenito com lâminas de lamito com fósseis, conglomerado, conglomerado lamoso, conglomerado arenoso.

As estruturas sedimentares encontradas nessas litologias são estrutura maciça, laminação incipiente e estratificação cruzada acanalada. A geometria das camadas é tabular ou lenticular. As cores observadas são branco, branco rosado, amarelo pálido, cinza claro, cinza, marrom muito pálido, vermelho pálido.

As camadas apresentam espessuras variando de 0,3 a 4 metros, e continuidade lateral de 0,6 a 50 metros.

A partir destas observações foi possível gerar a tabela 5, abaixo com informações importantes sobre as amostras disponíveis.

Tabela 5 - Informações sobre bacia sedimentar, código das amostras coletadas para o Trabalho de Formatura, litologia, cor de Munsell, estrutura sedimentar, geometria da camada, e espessura (m) / continuidade lateral (m) da camada. Locais indicados com asterisco foram descritos e amostrados pela discente nesse Trabalho de Formatura.

Bacia	Amostras	Código da fácies	Litologia	Cor de Munsell	Estrutura sedimentar	Geometria da camada	Espessura (m) / Continuidade lateral (m)
SP	LUZ	S	Arenito Fino	Branco (5Y 8/1)			
	BSP-51-3A	Sm	Arenito Conglomerático	Branco (5Y 8/1)	Maciço		
	BSP-51-3B	Sm	Arenito Conglomerático	Branco (5Y 8/1)	Maciço		
RE	QZ-19-B	S	Arenito Fino	Amarelo pálido (5Y 8/2)			
	TB-48-A	Sm	Arenito Lamoso	Cinza (5Y 6/1)	Laminação incipiente		
	TB-50-B	Sm	Arenito Lamoso	Cinza claro (5Y 7/1)	Laminação incipiente		
	TB-50-G	Gmm	Conglomerado Lamoso	Amarelo pálido (5Y 8/2)	Laminação incipiente		

CF-45-D2	F	Lamito com lentes de Arenito	Branco (2.5Y 8/1)				
RE-10-B	Gt	Conglomerado Arenoso	Branco (5Y 8/1)	Estratificação cruzada acanalada			
RE-11-B	Gmm	Conglomerado Arenoso	Branco (2.5Y 8/1)	Maciço			
RE-40-B	Sm	Arenito Lamoso	Cinza (5Y 5/1)	Maciço			
RE40-E	Sm	Arenito Conglomerático	Cinza claro (5Y 7/1)	Maciço			
RET-07-A1	St	Arenito médio	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Estratificação cruzada acanalada			0,15 / 0,60
RET-07-A2	Sm	Arenito Lamoso	Branco (2.5Y 8/1)	Maciço			0,80 / 0,75

RET-07-B1	Sm	Arenito Conglomerático	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Maciço		0,80 / 3 m
RET-07-B2	Gmm	Conglomerado Lamoso	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Maciço		0,30 / 0,80 m
RET-07-C	Fsm	Lamito	Cinza claro (5Y 7/1)	Maciço	Tabular	0,5 / 3
RET-07-D Topo	Sm	Lamito com lâminas de Conglomerado	Branco (2.5Y 8/1)	Maciço	Lenticular	0,3 / 0,75
RET-07-D Central	Ff	Lamito com lâminas de Lamito com Fósseis	Cinza (10YR 5/1)	Maciço	Lenticular	
RET-07-D Basal	Sm	Lamito	Branco (2.5Y 8/1)	Maciço	Lenticular	
RET-08.1-A1	Sm	Arenito Lamoso	Marrom muito pálido (10YR 8/4)	Maciço		1,7 / 40
RET-08.1-D	Fsm	Lamito	Marrom muito pálido (10YR 8/2)	Maciço	Tabular	0,53 / 10
RET-08.1-BA D	B= Sm AD= Fsm	Arenito Conglomerático com lâminas de Arenito Lamoso e Lamito	B: Marrom muito pálido (10YR 8/3) A: Marrom muito pálido	Maciço	Lenticular	0,16 / 5,1

				(10YR 8/3) D: Vermelho pálido (2.5YR 6/2)			
RET-08.1-A2	Sm	Arenito Lamoso	Branco rosado (5YR 8/2)	Maciço	Tabular	1,7 / 40	
RET-08.2-A1 Topo	Sm	Arenito Lamoso	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Maciço	Tabular	1,7 / 50	
RET-08.2-A1 Central	Sm	Arenito Lamoso	Marrom muito pálido (10YR 8/2)	Maciço	Tabular		
RET-08.2-A1 Basal	Sm	Arenito médio	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Maciço	Tabular		
RET-08.2-B1	Sm	Arenito Lamoso com lâminas de Arenito Conglomerático e Conglomerado	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Maciço	Tabular	0,3 / 50	
RET-08.2-AB	A= Sm B= Gmm	Arenito com lâminas de Conglomerado	Marrom muito pálido (10YR 8/2)	Maciço	Lenticular	0,4 / 50	
RET-08.2-D	Fsm	Lamito	Cinza claro (2.5Y 7/2)	Maciço	Tabular	2 / 50	
RET-08.2-A2	Sm	Arenito Lamoso	Branco	Maciço	Tabular	2,5 / 50	

				(2.5Y 8/1)			
VR	CP-01-A	S	Arenito Lamoso	Amarelo pálido (5Y 8/2)	Maciço		
	VRT-01	Sm	Arenito com lâminas de Conglomerado	Amarelo pálido (2.5Y 8/2)	Laminação incipiente		0,5 / 2
	VRT-02	Sm	Arenito Lamoso	Cinza claro (2.5Y 7/2)	Maciço	Tabular	4 / 23

8.5 Análise da Porosidade

8.5.1 Análise da Porosidade por MO

Para a análise por microscopia óptica, do conjunto de 34 amostras disponíveis, foram selecionadas 18 amostras, que estão listadas na tabela 5. Cabe ressaltar que durante a preparação das amostras para laminação, a amostra BSP-51-3B foi fraturada, o que impediu sua laminação. As amostras Luz e RE40-E tiveram impregnação comprometida e, assim, não foi possível quantificar a porosidade por contagem de grãos e poros, mas foi possível observar os tipos de porosidade presentes.

Nas seções delgadas, das amostras impregnadas com corante azul, foi possível observar os tipos de poros (intergranular e intragranular), quantificar a porosidade e identificar a mineralogia principalmente dos grãos do arcabouço da rocha.

A mineralogia encontrada é composta de grãos de quartzo (Figs. 18 a 26), feldspatos microclínio (Figs. 20 e 26) e plagioclásio, esmectita (Fig. 19), mica (Fig. 25A) e fragmento lítico (Fig. 23).

As porosidades encontradas são dos tipos intergranular (Fig. 19) e intragranular (Fig. 22B), predominando a primeira. A porosidade intergranular varia de 14% a 30%, com porosidade média de 22%, foram observadas em grãos de feldspato e fragmento lítico (Tabela 6). As amostras CF-45-D2, RE-11-B, RE-40-B e RET-07-C apresentam porosidade inferior a 1%.

Os poros intergranulares apresentam dimensão no maior eixo variando de 39,09 μm a 1149,25 μm , e com média de 429,12 μm .

Abaixo são apresentadas imagens ilustrativas das porosidades.

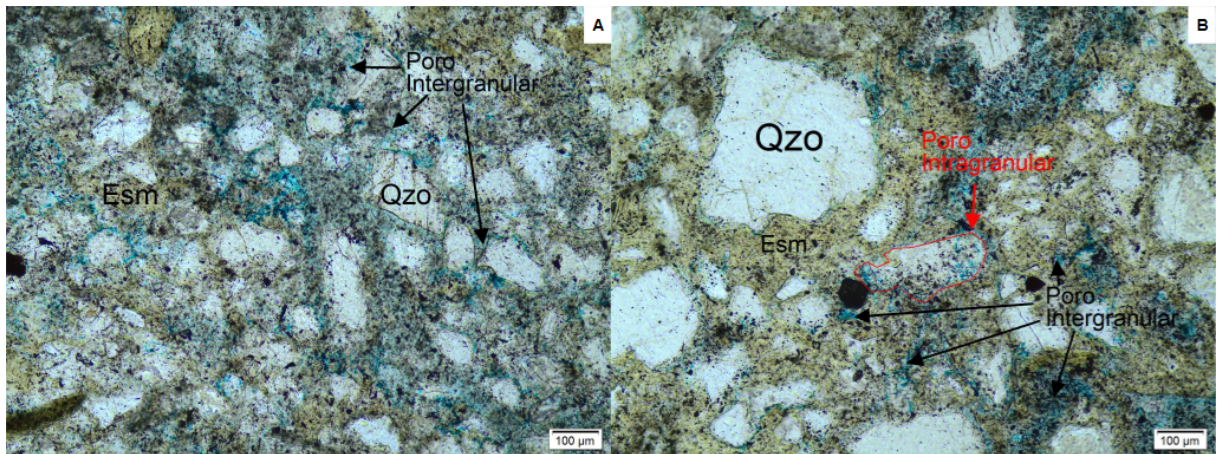


Figura 18: Imagem A: Foto de microscopia óptica da amostra LUZ (arenito fino). A impregnação da amostra não permitiu a contagem de grãos, mas foi possível identificar porosidade intergranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo) e esmectita (esm). Imagem B: Fotos de microscopia óptica da amostra QZ-19-B. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 14%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo) e esmectita (esm).

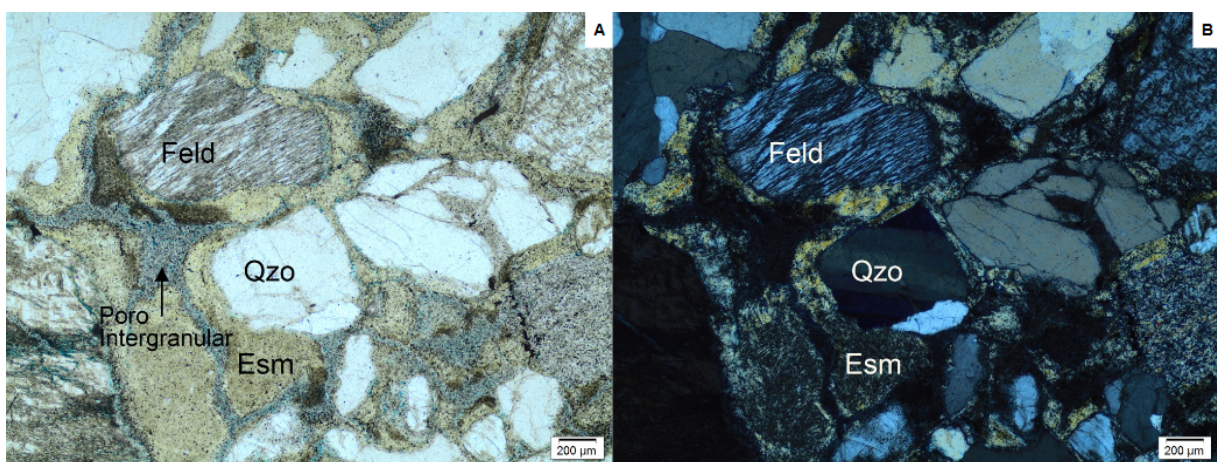


Figura 19: Fotos de microscopia óptica da amostra BSP-51-3A (Arenito Conglomerático), sendo a imagem A com nicóis paralelos, e a B com nicóis cruzados. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 25,3%, com porosidade principalmente intergranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld) e esmectita (esm).

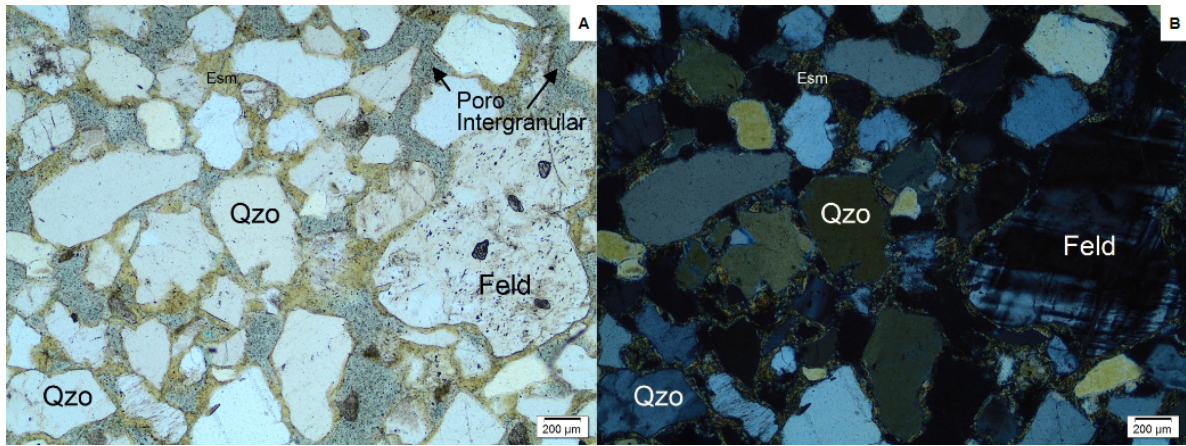


Figura 20: Fotos de microscopia óptica da amostra TB-48-A (Arenito Lamoso), sendo a imagem A com nicóis paralelos, e a B com nicóis cruzados. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 23,3%, com porosidade principalmente intergranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld) e esmectita (esm).

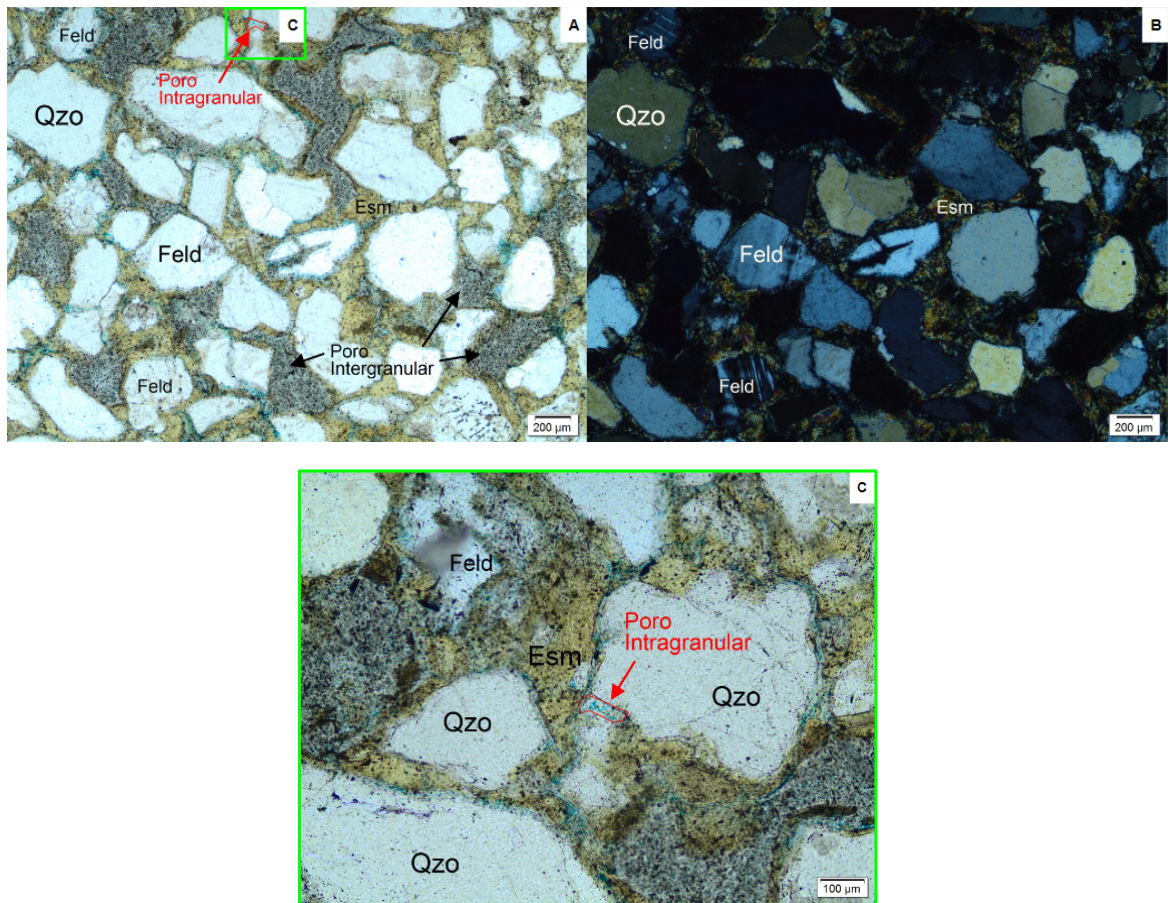


Figura 21: Fotos de microscopia óptica da amostra TB-50-B (Arenito Lamoso), sendo a imagem A com nicóis paralelos, a B com nicóis cruzados, e a C, uma imagem em detalhe de poros intragranulares. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 25,7%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld) e esmectita (esm).

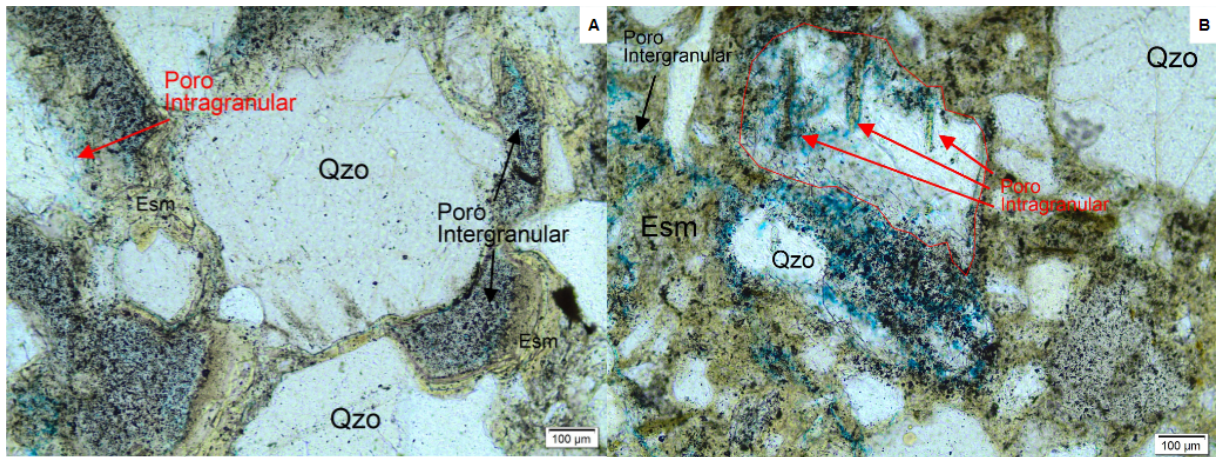


Figura 22: Imagem A: Fotos de microscopia óptica da amostra TB-50-G (Conglomerado Lamoso): A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 14,3%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld) e esmectita (esm). Imagem B: Fotos de microscopia óptica da amostra RE40-E (Arenito Conglomerático). A impregnação não permitiu contagem de grãos, mas foi possível identificar porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo) e esmectita (esm).

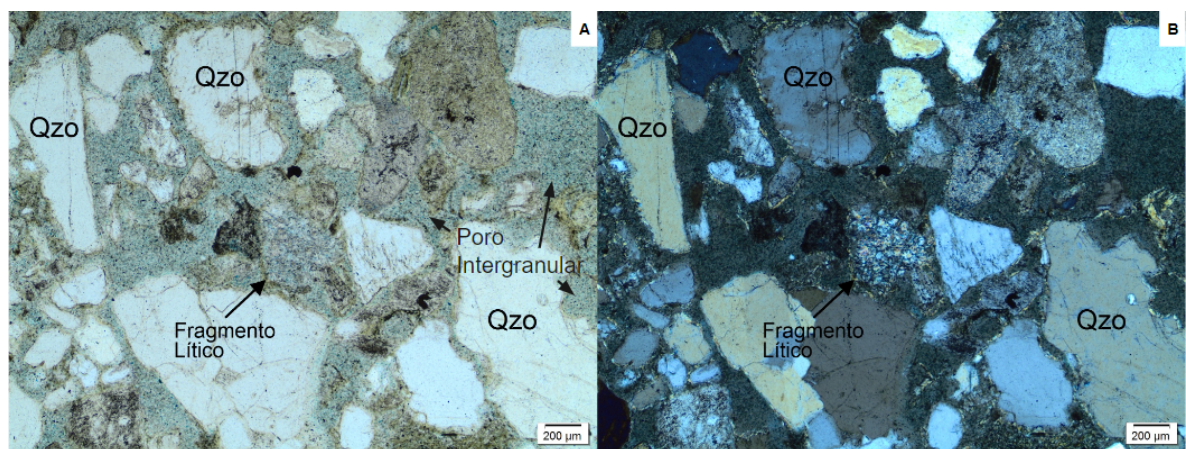


Figura 23: Fotos de microscopia óptica da amostra RE-10-B (Conglomerado Arenoso), sendo a imagem A com nicóis paralelos, e a B com nicóis cruzados. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 29,7%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld), esmectita (esm) e um fragmento lítico.

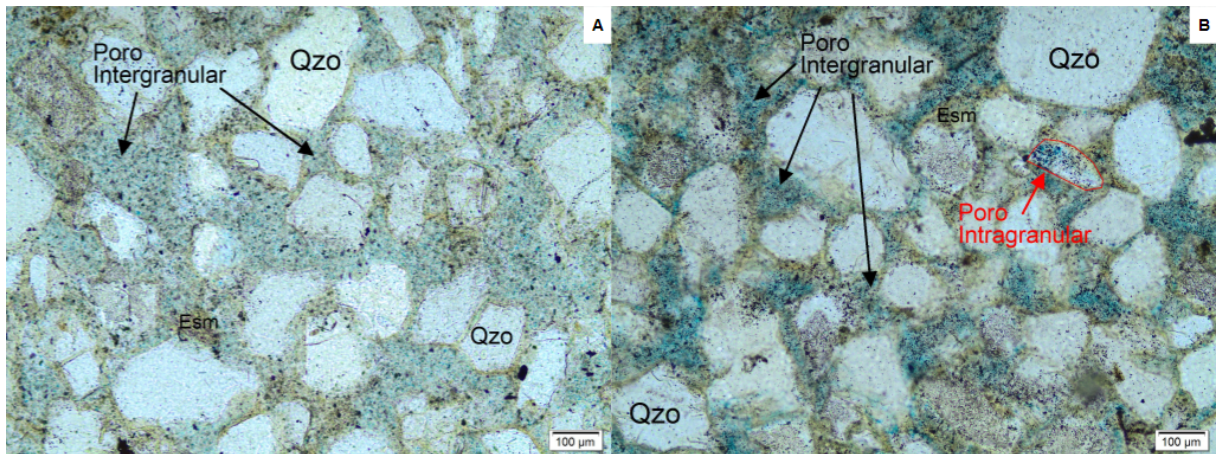


Figura 24: Imagem A: Fotos de microscopia óptica da amostra RET-07-A1 (Arenito médio). A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 30%, com porosidade principalmente intergranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo) e esmectita (esm). Imagem B: Fotos de microscopia óptica da amostra RET-07-A2 (Arenito Lamoso): A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 30%, com porosidade principalmente intergranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo) e esmectita (esm).

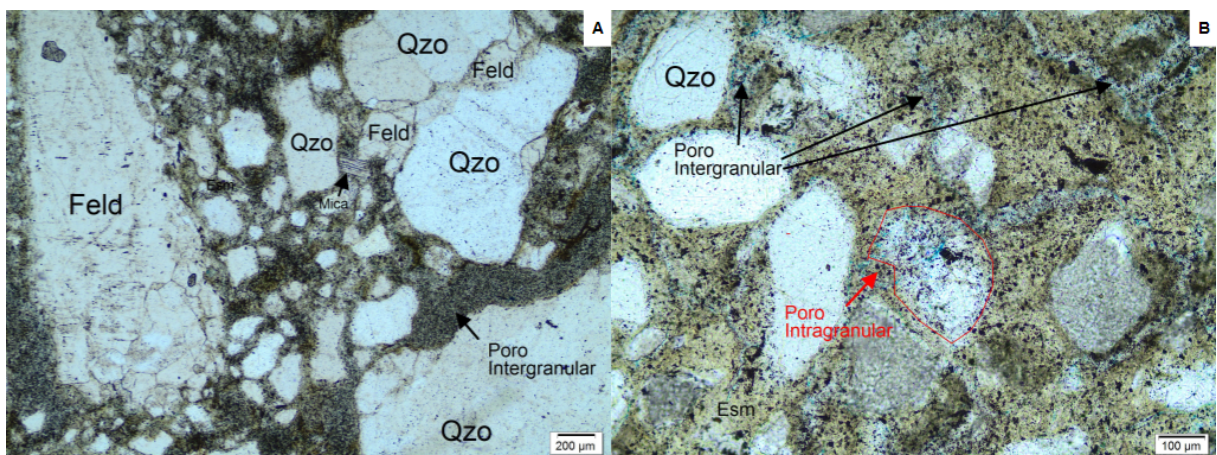


Figura 25: Imagem A: Fotos de microscopia óptica da amostra RET-07-B1 (Arenito Conglomerático): A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 17%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), feldspato (feld), esmectita (esm), e micas pontuais. Imagem B: Fotos de microscopia óptica da amostra VRT-02 (Arenito Lamoso): A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 20,3%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), grande quantidade de feldspato (feld), esmectita (esm), e micas pontuais.

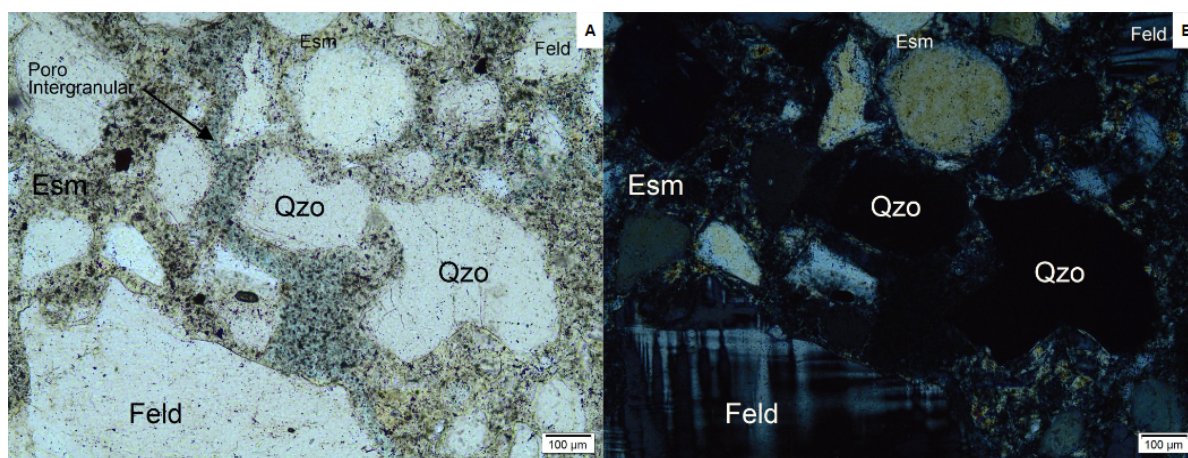


Figura 26: Fotos de microscopia óptica da amostra CP-01-A (Arenito Lamoso), sendo a imagem A com nicóis paralelos, e a B com nicóis cruzados. A impregnação permitiu contagem de grãos, onde a porosidade foi quantificada como de 16,7%, com porosidade intergranular e intragranular. Foi possível identificar grãos de quartzo (qzo), grande quantidade de feldspato (feld), esmectita (esm), e micas pontuais.

8.5.2 Análise da Porosidade por MEV

Para a análise quantitativa da porosidade via o *software ImageJ* foram selecionadas imagens de MEV de sete amostras, para as quais foi obtido o valor, em porcentagem, das porosidades intergranular ou intragranular de cada amostra. Para essa análise foram selecionadas imagens de MEV com distintas magnificações, variando de aumentos em 50 vezes a 5.000 vezes. As litologias analisadas correspondem a arenito fino, arenito lamoso, arenito conglomerático, conglomerado lamoso, conglomerado arenoso.

As porosidades encontradas são dos tipos intergranular (Fig. 31) e intragranular (Fig. 35), predominando a primeira. A porosidade intergranular varia de 5,6% a 31,7%. A porosidade intragranular ocorre em grãos de feldspato e varia de 11,6% a 18,4% (Tabela 6).

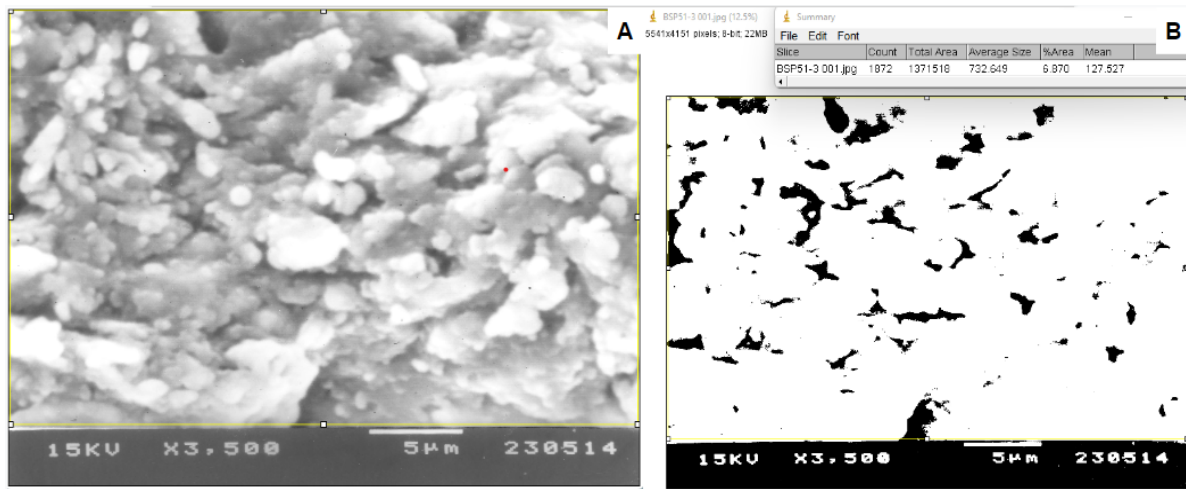


Figura 27: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 6,870%. Local BSP-51, Amostra: 3.

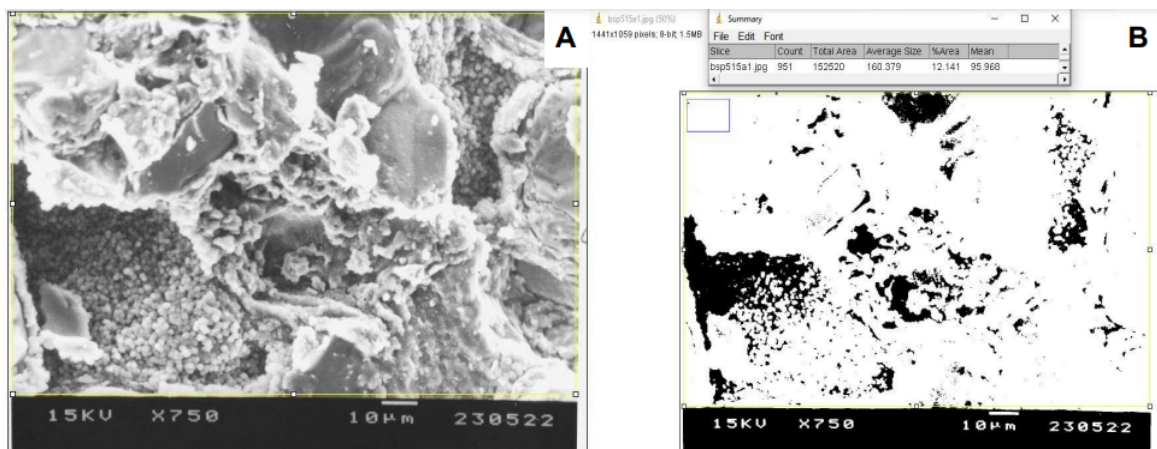


Figura 28: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 12,141%. Local BSP-51, Amostra: 5a.

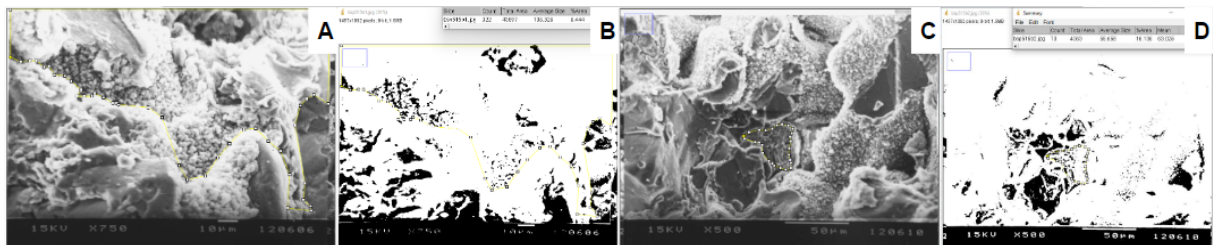


Figura 29: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 6,444%. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intragranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 16,106%. Local BSP-51, Amostra: 5b.

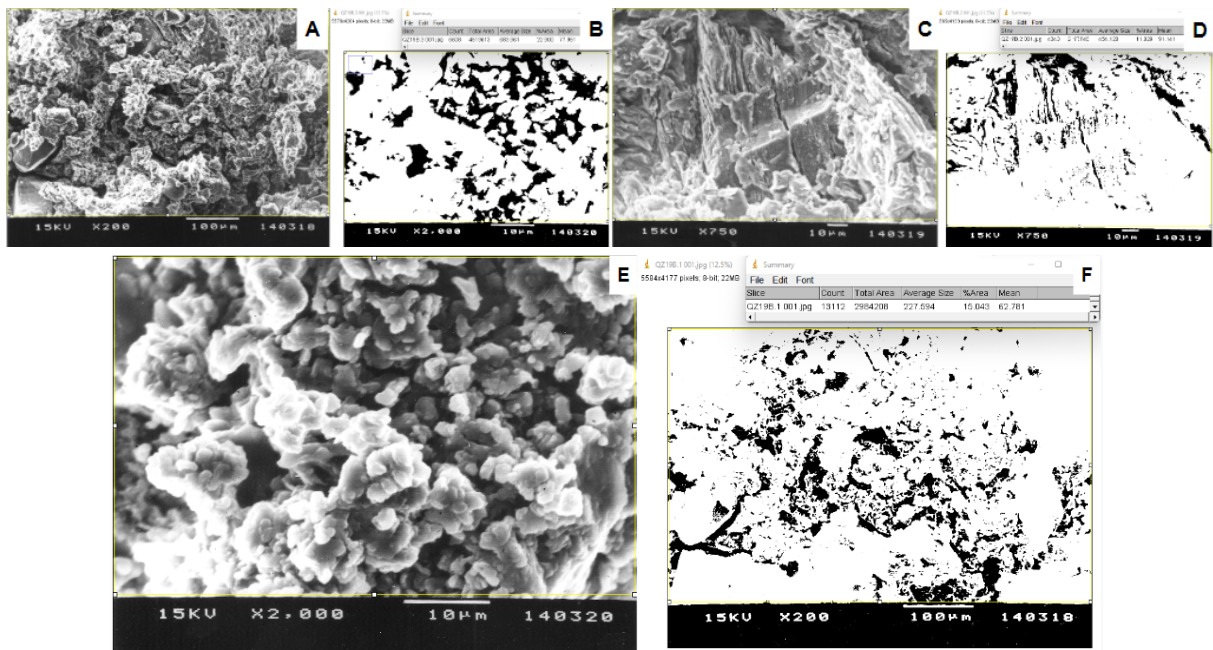


Figura 30: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 15,043%. Local QZ-19, Amostra: b. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 11,029%. Local QZ-19, Amostra: b. E: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. F: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 22,900%. Local QZ-19, Amostra: b.

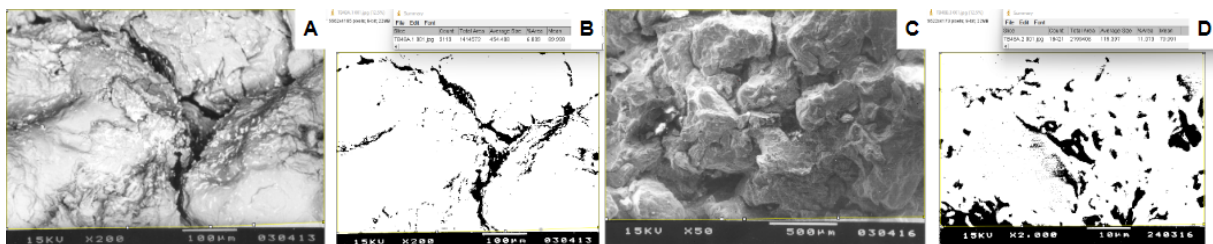


Figura 31: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 6,809%. Local TB-48, Amostra: a. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 11,073%. Local TB-48, Amostra: a.

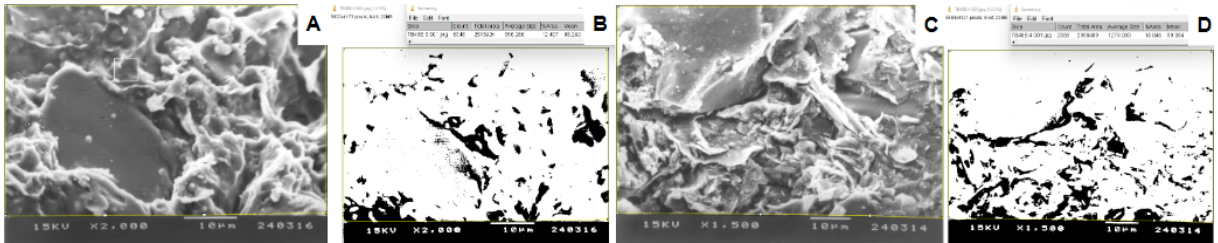


Figura 32: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 12,407%. Local TB-48, Amostra: b. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 15,046%. Local TB-48, Amostra: b.

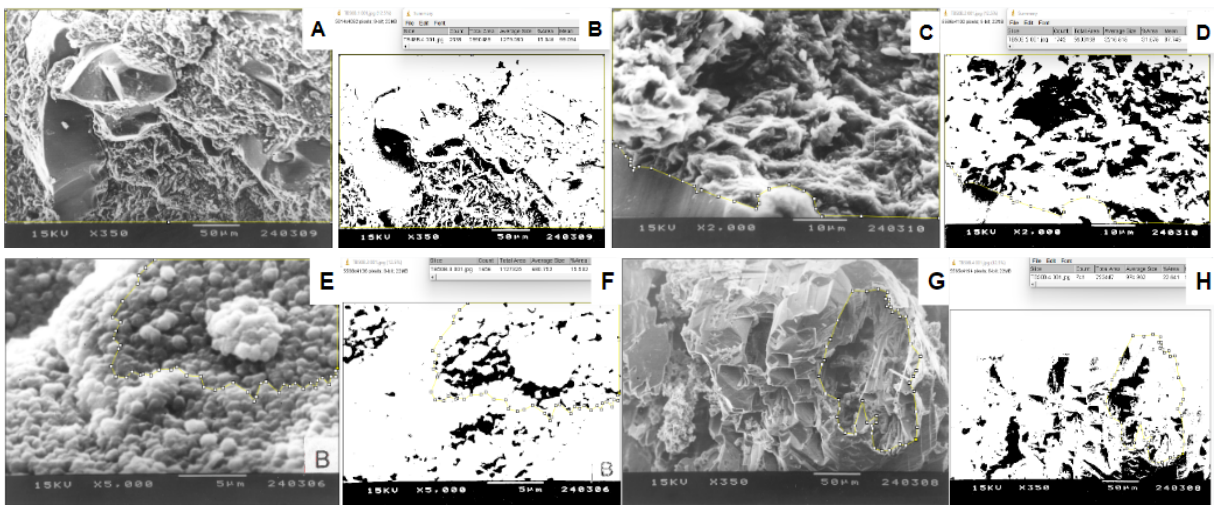


Figura 33: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 15,046%. Local TB-50, Amostra: b. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 31,675%. Local TB-50, Amostra: b. E: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. F: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 15,532%. Local TB-50, Amostra: b. G: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. H: Porcentagem da porosidade intragranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 22,641%. Local TB-50, Amostra: b.

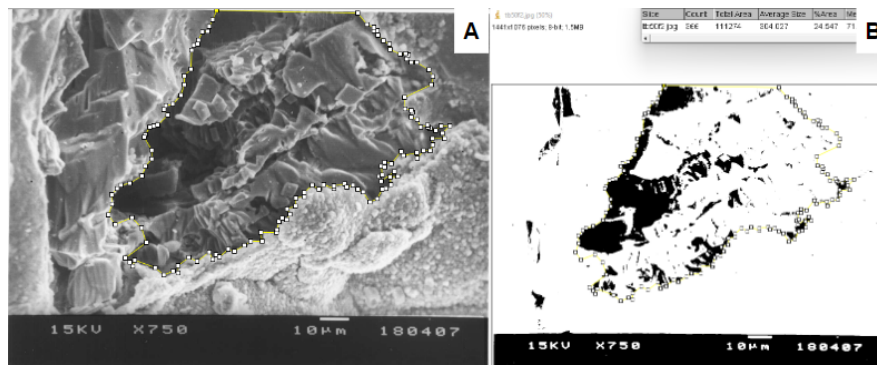


Figura 34: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intragranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 24,547%. Local TB-50, Amostra: f.

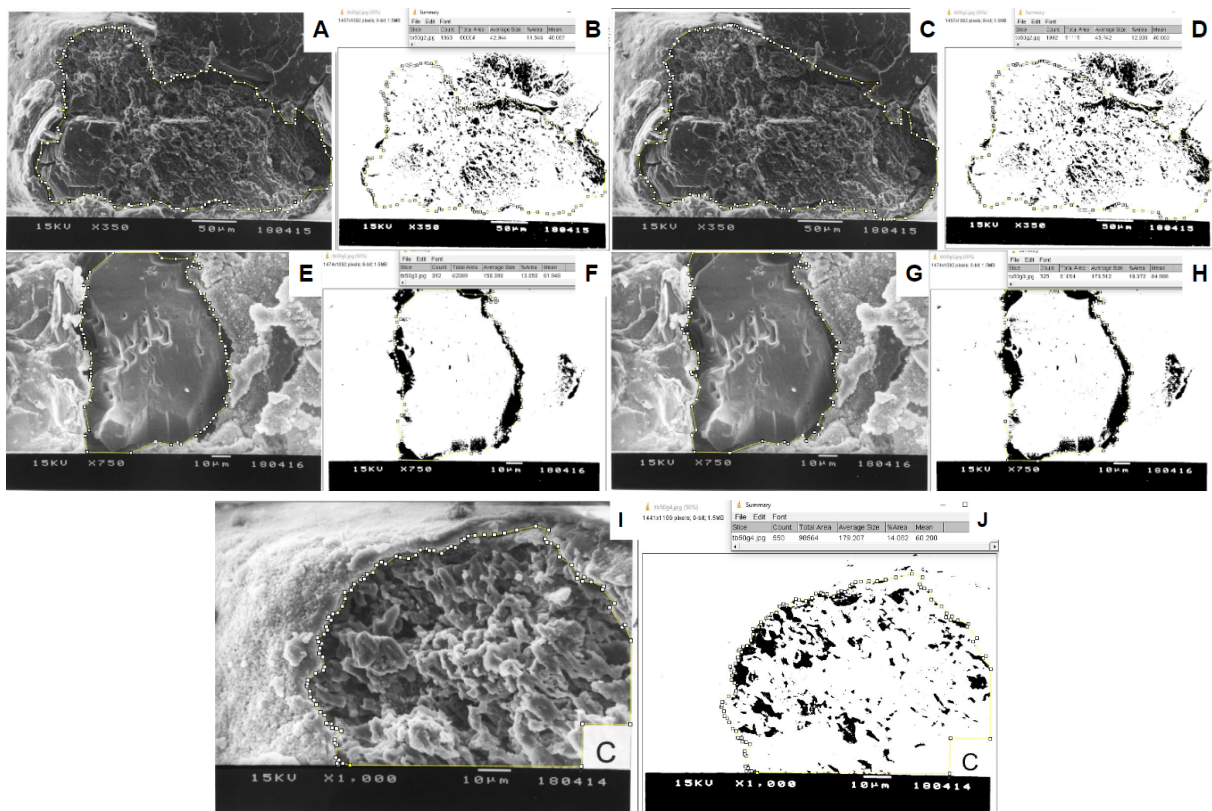


Figura 35: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intragranular mínima (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 11,546%. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intragranular máxima (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 12,038%. E: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. F: Porcentagem da porosidade intragranular mínima (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 13,050%. G: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. H: Porcentagem da porosidade intragranular máxima (“%Area”) delimitada na imagem G, resultando em 18,372%. Local TB-50, Amostra: g. I: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. J: Porcentagem da porosidade intragranular (“%Area”) delimitada na imagem I, resultando em 14,082%. Local TB-50, Amostra: g.

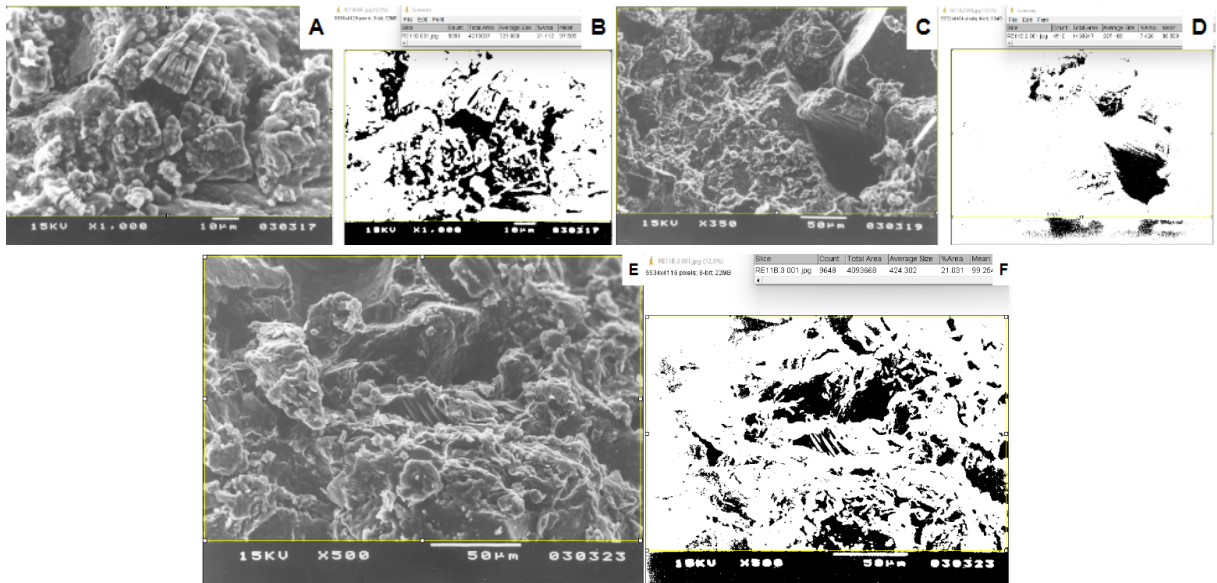


Figura 36: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 21,112%. Local RE-11, Amostra: b. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 7,426%. Local RE-11, Amostra: b. E: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. F: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 21,031%. Local RE-11, Amostra: b.

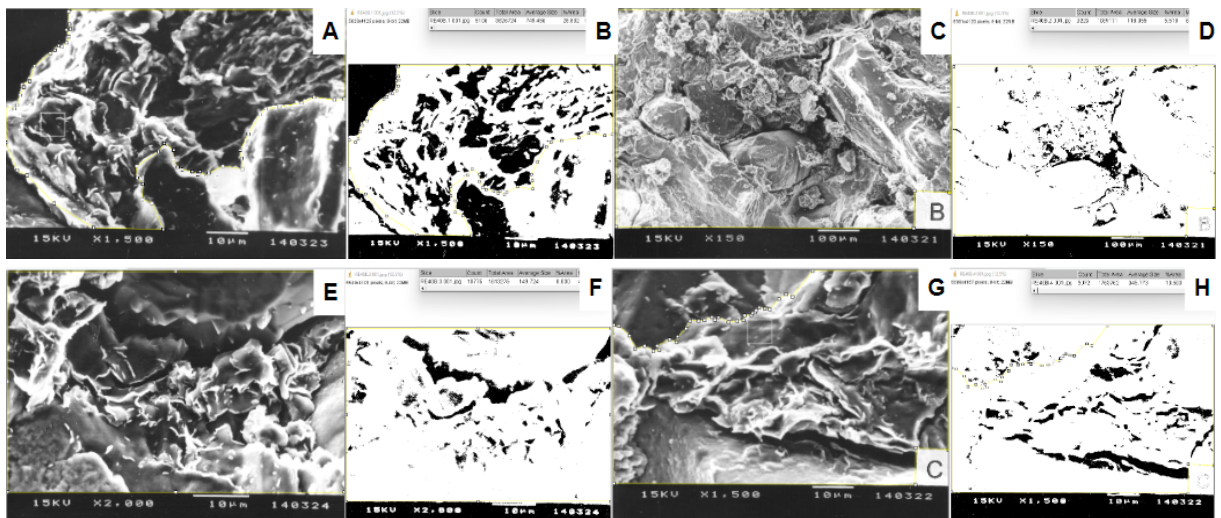


Figura 37: A: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. B: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem A, resultando em 28,832%. Local RE-40, Amostra: b. C: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. D: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem C, resultando em 5,578%. Local RE-40, Amostra: b. E: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. F: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 8,030%. Local RE-40, Amostra: b. G: Imagem de MEV com área selecionada em amarelo, para a qual foi analisada a porosidade. H: Porcentagem da porosidade intergranular (“%Area”) delimitada na imagem E, resultando em 10,503%. Local RE-40, Amostra: b.

Tabela 6 - Informações sobre código da fácies, litologia, estrutura sedimentar, amostras analisadas por MEV, amostras analisadas por MO, porcentagens das porosidades intragranular(%) e intergranular(%) determinadas a partir de imagens de MEV, Porosidade intergranular(%) determinada por MO, e tamanho máximo do poro estimado em MO.

Amostras	Código da fácies	Litologia	Estrutura Sedimentar	M O	M E V	Porosidade			
						Intergranular MEV (%)	Intragranular MEV (%)	Intergranular MO (%)	Tamanho Max. do Poro MO (µm)
LUZ	S	Arenito Fino		X					46,12
BSP-51-3A	Sm	Arenito Conglomerático	Maciço	X	X	6,870		25,333	629,72
BSP-51-3B	Sm	Arenito Conglomerático	Maciço		X				
QZ-19-B	S	Arenito Fino		X	X	15,043		14	39,09
						11,029			
						22,900			
TB-48-A	Sm	Arenito Lamoso	Laminação incipiente	X	X	6,809		23,333	698,25
						11,073			
TB-50-B	Sm	Arenito Lamoso	Laminação incipiente	X	X	15,046		25,667	626,60
						31,675			
						15,532			

						22,641			
TB-50-G	Gmm	Conglomerado Lamoso	Laminação incipiente	X	X		11,546	14,333	290,95
							12,038		
							13,050		
							18,372		
							14,082		
CF-45-D2	F	Lamito com lentes de Arenito		X				<1	
RE-10-B	Gt	Conglomerado Arenoso	Estratificação cruzada acanalada	X				29,667	513,98
RE-11-B	Gmm	Conglomerado Arenoso	Maciço	X	X	21,112		<1	
						7,426			
						21,031			
RE-40-B	Sm	Arenito Lamoso	Maciço	X	X	28,832		<1	
						5,578			
						8,030			
						10,503			
RE40-E	Sm	Arenito Conglomerático	Maciço	X					128,48

RET-07-A1	St	Arenito	Estratificação cruzada acanalada	X			30	626,83
RET-07-A2	Sm	Arenito Lamoso	Maciço	X			30	168,92
RET-07-B1	Sm	Arenito Conglomerático	Maciço	X			17	1149,25
RET-07-B2	Gmm	Conglomerado Lamoso	Maciço					
RET-07-C	Fsm	Lamito cimentado	Maciço	X			<1	
RET-07-D Topo	Sm	Lamito com lâminas de Conglomerado	Maciço					
RET-07-D Central	Ff	Lamito com lâminas de Lamito com Fósseis	Maciço					
RET-07-D Basal	Sm	Lamito	Maciço					
RET-08.1-A1	Sm	Arenito Lamoso	Maciço					
RET-08.1-D	Fsm	Lamito	Maciço					
RET-08.1-BAD	B= Sm AD= Fsm	Arenito Conglomerático com lâminas de Arenito Lamoso e Lamito	Maciço					
RET-08.1-A2	Sm	Arenito Lamoso	Maciço					

RET-08.2-A1 Topo	Sm	Arenito Lamoso	Maciço						
RET-08.2-A1 Central	Sm	Arenito Lamoso	Maciço						
RET-08.2-A1 Basal	Sm	Arenito	Maciço						
RET-08.2-B1	Sm	Arenito Lamoso com lâminas de Arenito Conglomerático e Conglomerado	Maciço						
RET-08.2-AB	A= Sm B= Gmm	Arenito com lâminas de Conglomerado	Maciço						
RET-08.2-D	Fsm	Lamito	Maciço						
RET-08.2-A2	Sm	Arenito Lamoso	Maciço						
CP- 01-A	S	Arenito Lamoso	Maciço	X				16,667	413,49
VRT-01	Sm	Arenito com lâminas de Conglomerado	Laminação incipiente						
VRT-02	Sm	Arenito Lamoso	Maciço	X				20,333	246,90

9. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como anteriormente mencionado, visando a busca de alternativas de reservatórios geológicos, este trabalho objetiva o estudo da heterogeneidade da porosidade de arenito fluvial paleógeno da Formação Resende, presente nas bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (Figs. 1 e 2), para avaliar seu potencial para o armazenamento geológico de CO₂ capturado nesta porção do sudeste brasileiro, onde ocorre grande parte das emissões nacionais.

O mapa (Fig. 3) regional da área de estudo com a localização de fontes emissoras fixas de CO₂ na região sudeste do Brasil e localizadas dentro do raio de 150 km a partir da cidade de Taubaté, ponto central da Bacia de Taubaté, mostrou que há diversidade nos tipos de fontes fixas, localizadas principalmente na região oeste da Bacia de São Paulo e incluindo 22 cimenteiras, 24 refinarias, 30 siderúrgicas, e 22 usinas termelétricas, que poderiam se beneficiar da implantação da tecnologia CCS em uma bacia sedimentar na região. O mapa das bacias apresentado no Anexo 1 contém a distribuição dos afloramentos com amostras da Formação Resende estudadas nesse Trabalho de Formatura.

O trabalho elaborado indica que a Formação Resende apresenta uma variedade de arenitos (arenito médio, fino, lamoso, conglomerático, com lâminas de conglomerado e com lâminas de lamito com fósseis), conglomerados (conglomerado lamoso e arenoso) e lamitos (cimentados, sem e com lentes de arenito). Essas rochas variam na abundância em matriz e granulometria, e ainda se apresentam tanto em porções tabulares métricas quanto em porções lenticulares centimétricas. As estruturas sedimentares encontradas nessas litologias são estrutura maciça, laminação incipiente e estratificação cruzada acanalada. As características mencionadas e observadas no campo apontam o ambiente fluvial para deposição dos arenitos e conglomerados com laminação incipiente e estratificação cruzada, e de leques aluviais para os lamitos maciços, em concordância com autores prévios (Ramos 2003, Riccomini *et al.* 2004). Arenitos e conglomerados maciços são interpretados como depósitos gravitacionais, de acordo com Miall (2006), e provavelmente associados também aos leques aluviais. A exceção seriam as amostras BSP-51-3A e BSP-51-3B que correspondem a diques clásticos de arenitos conglomeráticos maciços da Formação Resende na Bacia de São Paulo.

Conforme já apontado por Leetaru & McBride (2009), Olierook *et al.* (2013) e Leetaruand & Freiburg (2014), camadas tabulares métricas de arenitos com pouca matriz argilosa podem auxiliar na estocagem de CO₂, sendo essa uma feição comumente

observada na Formação Resende, na qual os arenitos apresentam-se como corpos tabulares com espessuras de 0,15 até 4 m observadas na Bacia de Resende.

Através da observação das propriedades macroscópicas analisadas em campo, micrografia óptica e micrografia eletrônica de varredura, apresenta-se a seguir um quadro geral da variação da porosidade, o que leva à interpretação da sua heterogeneidade.

A microscopia óptica (MO) permitiu a observação da heterogeneidade da porosidade, que restringiu-se aos tipos intergranular e intragranular, mas não foi possível calcular a porosidade intragranular. A porosidade predominante é a intergranular, sendo a média observada nos arenitos de 22,4% (de 14% a 30%). Alguns poros são preenchidos por argilomineral (esmectita). Os poros tem em média, 429,12 μm , classificado como tipo de poro macrocapilar; variando entre 39,09 μm (poro capilar) a 1149,25 μm (poro macrocapilar) (Mann *et al.*, 1997). Os valores obtidos nesse Trabalho de Formatura concordam com valores de Barboza (2009), que observou em arenitos de subsuperfície elevada porosidade intergranular variando de 11 e 16%, considerada boa porosidade para reservatório (Barboza, 2009). Brêda observou porosidade total de 17%, variando de 10% a 20%, concluindo ser boa porosidade. No entanto, o autor destacou a baixa conectividade entre os poros, logo baixa permeabilidade. Entretanto, indicou que a presença de fraturas pode melhorar a conectividade entre os poros (Barboza, 2009; Brêda *et al.*, 2013).

Em amostras de arenitos coletados na Bacia de Resende neste Trabalho de Formatura notou-se que há macroporosidade (Fig. 20), cuja origem é atribuída aos efeitos do intemperismo uma vez que a rocha está exposta. Essa condição também foi observada por Barboza (2009) na Bacia de Resende.

A porosidade observada através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi principalmente intergranular, com média de 30,7% (de 5,6% a 31,7%), segundo o tratamento das imagens pelo *software ImageJ*. Estes valores não são tão distintos dos contabilizados em seção delgada através da microscopia óptica, que variaram de 14% a 30%. Adicionalmente, o método de MEV permitiu observar e calcular a porosidade intragranular em feldspatos, resultando em média 13,8% (de 11,6% a 18,4%), o que na microscopia óptica não foi possível, pois permitiu apenas observar a porosidade intragranular.

Tendo em vista os casos internacionais, a Austrália com o arenito do Membro Wonnerup, de porosidade de 10% a 20%; e os EUA com o arenito Mount Simon, de porosidade média de 22%, e que ambos se apresentam como bons reservatórios para CO₂. Enquanto a porosidade observada no seguinte trabalho foi de 30,7% por MEV e 22,4% por

MO, o que indica que possivelmente os arenitos da Formação Resende seriam bons reservatórios (Kelemen, 2019; Leetaruand & Freiburg, 2014; Olierook *et al.*, 2013).

O Membro Yalgorup na Austrália tem sua porção superior preenchido parcialmente por depósitos pantanosos de litologias pelíticas de baixa permeabilidade, que indicam bom potencial de vedação (Olierook *et al.*, 2013). Assim como no Membro Yalgorup, as bacias estudadas nesse Trabalho de Formatura, os lamitos apresentam espessura variando de 0,5 até 2 m e possuem baixa porosidade (<1%), como observado através da MO, sendo potenciais como selantes para o armazenamento de CO₂.

A partir do mapa das fontes fixas emissoras de CO₂ vizinhas às bacias em estudo e considerando todas as características apresentadas da Formação Resende e das bacias em que se encontra, bem como os critérios para avaliar e classificar bacias sedimentares em termos de sua adequação ao armazenamento de CO₂, avalia-se que os arenitos da Formação Resende se tornam o principal alvo de estudo para estocagem de CO₂ para as fontes estacionárias desta porção do sudeste do Brasil, pois situam-se próximos às fontes e em posição intermediária entre as bacias do Paraná e Santos, o que torna o armazenamento de CO₂ economicamente viável (Bachu, 2010).

10. CONCLUSÕES

Tendo em vista as metas internacionais de redução de emissão de carbono, como o Acordo de Paris, que visa limitar o aquecimento médio da atmosfera preferencialmente a 1,5°C, e a existência da tecnologia CCS, capaz de reduzir em quantidade considerável as emissões (UNFCCC, 2015), este trabalho indica que a redução de emissões de CO₂ através do armazenamento de carbono é uma boa opção para o Brasil, principalmente nas proximidade dos grandes centros econômicos, que abrigam grande parte das fontes de emissão fixa nacionais.

Através dos estudos realizados ao longo deste Trabalho de Formatura, conclui-se que os arenitos da Formação Resende são aptos para o armazenamento geológico de CO₂, tendo em vista que se apresentam espessuras adequadas, porosidade ideal e estão dispostos em locais próximos a fontes emissoras fixas de CO₂.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, A. P. B. (2001). Análise dos padrões de Fraturamento Neotectônico e a sua possível Aplicação na Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar de Resende (RJ). Monografia de Graduação, 61pp.
- Amyx, J. W., Bass, D. M., Whiting, R. L. (1960). *Petroleum Reservoir Engineering Physical Properties*. New York: McGraw-Hill.
- Arias, P. A. et al. (2021). Technical summary IPCC.: climate change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Bachu, S. (2010). Screening and selection criteria, and characterisation techniques for the geological sequestration of carbon dioxide (CO₂). In *Developments and innovation in carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology* (pp. 27-56). Woodhead Publishing.
- Baklid, A., Korbol, R., & Owren, G. (1996, October). Sleipner Vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. OnePetro.
- Barboza, A. C. L. (2009). Integração de Análises Sedimentológicas e Hidrogeológicas como Base para Caracterização da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ) como Reservatório. Rio de Janeiro.
- Brêda, T. C., Ramos, R. R. C., & Mello, C. L. (2013). Análise Petrográfica de Arenitos da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ). *Geosciences = Geociências*, 32(4), 659-676.
- Carvalho, M. D. O. (2020). Aplicação de litogeoquímica, isótopos de Sm-Nd e Sr e datação U-Pb de zircão detrítico para estudos de proveniência dos sedimentos aluviais da Bacia de Resende.
- DE MELO, M. S., Riccomini, C., & Hasui, Y. (1985). GEOLOGIA E EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE BACIAS TAEROGÊNICAS. *Revista Brasileira de Geociências*, 15.
- Duncan, D. W., & Morrissey, E. A. (2011). *The Concept of geologic carbon sequestration*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Fambrini, G. L., Neumann, V. H. M., Menezes-Filho, J. A. B., Silva-Filho, D., Wellington, F., & De Oliveira, É. V. (2017). Facies architecture of the fluvial Missao Velha formation

(late Jurassic–early cretaceous), Araripe basin, northeast Brazil: paleogeographic and tectonic implications. *Acta Geologica Polonica*, 67(4).

ForestGIS. (2022). Bacias Sedimentares Brasileiras. DownloadGIS. https://forest-gis.com/shapefiles/bacias_sedimentares_brasileiras.kmz.

de Coninck, H., & Benson, S. M. (2014). Carbon dioxide capture and storage: issues and prospects. *Annual review of environment and resources*, 39, 243-270.

IBGE. (2021). Malha Municipal [Map]. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>

Ghazi, S., & Mountney, N. P. (2009). Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession: The Permian Warchha Sandstone, Salt Range, Pakistan. *Sedimentary Geology*, 221(1-4), 99-126.

Global CCS Institute. 2022. CCS is a climate change technology. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/> . Acesso em: 11 fev 2022.

Glover, P.W.J. (2001). Porosity. *Petrophysics MSc Petroleum Geology Course Notes*, University of Aberdeen, UK, pp. 10-20.

Gretag Macbeth : Munsell Color. (2000). *Munsell soil color charts*.

Hansen, J. E. (2005). A slippery slope: How much global warming constitutes “dangerous anthropogenic interference”? *Climatic Change*, 68(3), 269-279.

Hook, J. R. (2003). An introduction to porosity. *Petrophysics*, 44, 205-212.

IEMA (2021). Queima de combustíveis fósseis eleva emissões no Sudeste. Disponível em <https://energiaeambiente.org.br/queima-de-combustiveis-fosseis-eleva-emissoes-no-sudeste-20210428#:~:text=O%20setor%20de%20energia%20%C3%A9,a%2020%25%20do%20total%20nacional>>. Acesso em 09 de maio de 2022

IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C.

Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)].

Jorden, J R, & Campbell, F L (1985). *Well logging: Rock properties, borehole environment, mud and temperature logging*. United States.

Kelemen, P., Benson, S. M., Pilorgé, H., Psarras, P., & Wilcox, J. (2019). An overview of the status and challenges of CO₂ storage in minerals and geological formations. *Frontiers in Climate*, 1, 9.

Ketzer, J. M., Machado, C. X., Rockett, G. C., & Iglesias, R. S. (2015). Brazilian atlas of CO₂ capture and geological storage.

Leetaru, H. E., & Freiburg, J. T. (2014). Litho-facies and reservoir characterization of the Mt Simon Sandstone at the Illinois Basin–Decatur Project. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 4(5), 580-595.

Leetaru, H. E., & McBride, J. H. (2009). Reservoir uncertainty, Precambrian topography, and carbon sequestration in the Mt. Simon Sandstone, Illinois Basin. *Environmental Geosciences*, 16(4), 235-243.

Mann, U., Hantschel, T., Schaefer, R. G., Krooss, B., Leythaeuser, D., Littke, R., Sachsenhofer, R. F. (1997). Petroleum migration: mechanisms, pathways, efficiencies and numerical simulations. In: D.H. Welte, B. Horsfield, D. Baker. (Eds.), *Petroleum and Basin Evolution*. Berlin: Springer.

Masson-Delmotte, V. (06 out. 2018). Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas: Sumário para Formuladores de Políticas Aquecimento Global de 1,5°C. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>.

Miall, A.D. (2006). *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. Springer-Verlag, Berlin, 589p.

Ministério do Meio Ambiente (2022). Fontes Fixas. Disponível em <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas.html>>. Acesso em 09 de maio de 2022.

Newell, P., & Ilgen, A. G. (2019). Overview of geological carbon storage (GCS). In: *Science of Carbon Storage in Deep Saline Formations*. pp. 1-13. Elsevier.

Olierook, H. K., Delle Piane, C., Timms, N. E., Esteban, L., Rezaee, R., Mory, A. J., & Hancock, L. (2014). Facies-based rock properties characterization for CO₂ sequestration: GSWA Harvey 1 well, Western Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 50, 83-102.

Pelissari, M. R., & Tassinari, C. C. G. (2020). Possibilidades para armazenamento geológico de CO₂ emitido pelo complexo termelétrico Jorge Lacerda, Santa Catarina, Brasil. In Rio Oil & Gas Expo and Conference.

Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., ... & Ibrahim, Z. Z. (2022). Technical summary. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. (2020, maio 11). Concentração global de CO₂ bate recorde mesmo durante crise do COVID-19. UN Environment Programme. UNEP.
<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/concentracao-global-de-co-2-bate-recorde-mesmo-durante-crise-do>.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. (2022, abril 4). Mudança Climática 2022: Mitigação da Mudança Climática, a contribuição do Grupo de Trabalho III para o Sexto Relatório de Avaliação. UN Environment Programme.
<https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/mudanca-climatica-2022-mitigacao-da-mudanca-climatica-contribuicao-do-grupo-de#:~:text=O%20Painel%20Intergovernamental%20sobre%20Mudan%C3%A7as,ser%C3%A1%20finalizado%20ainda%20este%20ano>.

Ramos, R. R. C. (2003). Sistemas aluviais terciários da Bacia de Resende, Estado do Rio de Janeiro, Brasil: análise de fácies e revisão estratigráfica. Rio de Janeiro.

Rasband WS. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, imagej.nih.gov/ij/, 1997–2012.

Rev, F. C. P. L. (2015). Adoption of the Paris Agreement Proposal by the President. vol, 21932, 1-32.

Riccomini, C. (1989). O rift continental do sudeste do Brasil (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., & Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 383-405.

Rockett, G. C. (2010). Associação de fontes emissoras e reservatórios potenciais para armazenamento geológico de CO₂ na Bacia de Campos, Brasil.

Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., ... & Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325-332.

Sant'Anna, L. G. (1999). Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Sant'Anna, L. G., & Riccomini, C. (2001). Cimentação hidrotermal em depósitos sedimentares paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil: mineralogia e relações tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(2), 231-240.

Sant'anna, L. G., Riccomini, C., Dantas, E., Fetter, A. H., Roig, H. L., & Hackspacher, P. C. (2003). Provenance of detrital clay minerals of the continental rift of southeastern Brazil: mineralogical and Sm-Nd data. *Short Papers*, 271-273.

Schön, J. H. (2014). *Propriedades físicas das rochas aplicadas à engenharia de petróleo*. Rio de Janeiro: Elsevier.

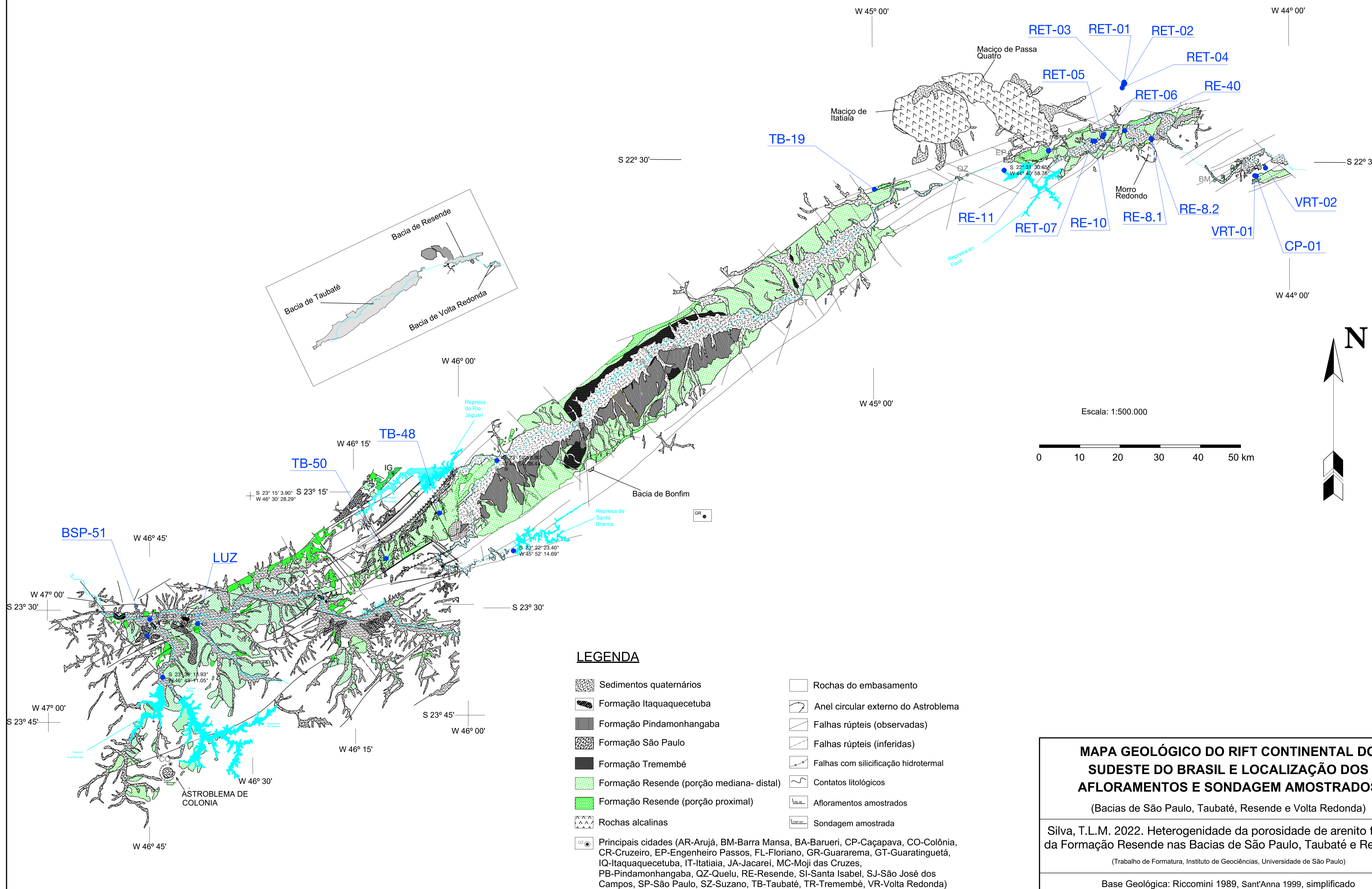
Shanmugam, G. (1985). Types of porosity in sandstones and their significance in interpreting provenance. In *Provenance of Arenites* (pp. 115-137). Springer, Dordrecht.

UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Paris Climate Change Conference - November 2015.

Zhang, D., & Song, J. (2014). Mechanisms for geological carbon sequestration. *Procedia IUTAm*, 10, 319-327.

MAPA GEOLÓGICO DO RIFT CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL E LOCALIZAÇÃO DOS AFLORAMENTOS E SONDAGEM AMOSTRADOS

(BACIAS DE SÃO PAULO, TAUBATÉ, RESENDE E VOLTA REDONDA)



MAPA GEOLÓGICO DO RIFT CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL E LOCALIZAÇÃO DOS AFLORAMENTOS E SONDAGEM AMOSTRADOS
(Bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda)

Silva, T.L.M. 2022. Heterogenidade da porosidade de arenito fluvial da Formação Resende nas Bacias de São Paulo, Taubaté e Resende.
(Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo)

Base Geológica: Riccomini 1989, Sant'Anna 1999, simplificado