

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RENNAN CARDOSO DOS SANTOS

**MODELAGEM 3D GEOLÓGICA DE SOLEIRAS EM SUBSUPERFÍCIE: ESTUDO
DE CASO COMO POTENCIAL PARA SEQUESTRO DE CO₂ NA DEPRESSÃO
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Caçapava do Sul

2025

RENNAN CARDOSO DOS SANTOS

**MODELAGEM 3D GEOLÓGICA DE SOLEIRAS EM SUBSUPERFÍCIE: ESTUDO
DE CASO COMO POTENCIAL PARA SEQUESTRO DE CO₂ NA DEPRESSÃO
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Matheus Silva Simões

Caçapava do Sul
2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S237m Santos, Rennan Cardoso dos

Modelagem 3D geológica de soleiras em subsuperfície: estudo
de caso como potencial para sequestro de CO na depressão
central do Rio Grande do Sul. / Rennan Cardoso dos Santos.

77 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

"Orientação: Matheus Silva Simões".

1. Modelagem geológica 3D. 2. Soleiras basálticas. 3.
Armazenamento geológico de CO. 4. Depressão Central do Rio
Grande do Sul. 5. Província Magmática Paraná-Etendeka. I.
Título.

RENNAN CARDOSO DOS SANTOS

**MODELAGEM 3D GEOLÓGICA DE SOLEIRAS EM SUBSUPERFÍCIE: ESTUDO DE CASO
COMO POTENCIAL PARA SEQUESTRO DE CO₂ NA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO
GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 09 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Matheus Silva Simões

Orientador

UNIPAMPA

Dra. Sissa Kumaira

UNIPAMPA

Profª. Eduarda Tobolski

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MATHEUS SILVA SIMOES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SISSA KUMAIRA, GEOLOGO**, em 18/12/2025, às 13:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDUARDA TOBOLSKI, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 18/12/2025, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1932616** e o código CRC **C1962394**.

Dedico este trabalho ao meu eu lírico.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso só foi possível graças a um conjunto de oportunidades, colaborações e apoios recebidos ao longo desta trajetória. Expresso, portanto, minha sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que contribuíram direta ou indiretamente para que este objetivo fosse alcançado. Agradeço à Universidade Federal do Pampa e às políticas de inclusão promovidas pelo Governo Federal, que proporcionaram o acesso ao conhecimento geocientífico, vital para compreender nossa relação com o meio físico. Manifesto, igualmente, profunda gratidão à minha família — pais, avós, primos e tios — que, diante de inúmeros desafios, estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, acolhimento e estímulo, representando a conquista de ser o primeiro integrante de duas famílias numerosas a ingressar e concluir uma graduação em universidade pública federal. Registro ainda meu agradecimento ao corpo docente do curso de Geologia, em especial aos(as) professores(as) Maria Del Pilar, Mateus Simões, Tiago Gregory, Giuseppe De Toni, Daniele Tolfo, Vinicius Matté, Luís Eduardo de Souza, Ezequiel Galvão, Sissa Kumaira, Everton Frigo, Felipe Guadagnin, Osmar Giulliani, Arlita Soares e José Rojas, bem como aos servidores técnico-administrativos e terceirizados, cuja atuação, de diferentes formas, contribuiu para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal. Sou igualmente grato às amigas que construí ao longo desta jornada e que estiveram presentes nos momentos mais desafiadores. Agradeço, em especial, a Rogger, Gabriel, John, Layandra, Ricardo, Maciel, Filipe, Aline, Alberto, Thayanne, Mônica, Diego, Bruna, Saulo, Hernanes, Rômulo, Caio, Tainara, Cassiano, Sr. Mesquita, Hugo, João, Beatriz, Augusta, Sueli, Juliana, Iuri, André, Will, Pedro B., Pedro M., Roberto, Eder, Alex, Mariah, Andyara, Geovana, Jeandro, Jeferson, Anna Clara, Fernando, Ronisson, Vinicius, Flávia, Gabriela, Daniela, Francesco, Caleb, Everton e tantas outras pessoas que, mesmo não mencionadas nominalmente, permanecem guardadas com apreço na memória. Por fim, agradeço à cidade de Caçapava do Sul por ter sido o cenário de vivências que moldaram não apenas minha formação acadêmica, mas também minha trajetória pessoal, e que levarei comigo ao longo da vida.

“Um asteróide pequeno que todos chamam de Terra”.

Zé Ramalho

RESUMO

O presente trabalho apresenta a modelagem 3D geológica de complexos de soleiras basálticas em subsuperfície na Depressão Central do Rio Grande do Sul (DCRS), com vistas à avaliação de seu potencial como reservatórios para armazenamento geológico de CO₂. A necessidade crescente de implementação de tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) para mitigação das mudanças climáticas impulsionou a investigação de formações geológicas adequadas, dentre as quais os complexos de soleiras associados à Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE) destacam-se pela capacidade de mineralização permanente do carbono. A metodologia empregou 96 furos de sondagem provenientes do acervo da CPRM (1980) e dados aeromagnetométricos do Projeto Aerogeofísico Escudo Sul-Rio-Grandense (2010), processados através de modelagem 3D implícita no software Leapfrog Geo® mediante aplicação do interpolador FastRBF™. A área de estudo, situada a sudeste do município de Rio Pardo/RS, abrange 286 km² e revelou a presença de três corpos intrusivos principais (Sill A, B e C) com espessuras individuais variando entre 0,4 m e 18 m, distribuídos em profundidades de 41 m a 465 m. O corpo intrusivo de maior expressão (Sill A) apresenta dimensões de 12,1 km × 7,7 km, volume estimado de 664.570.000 m³ e espessura média de 7,3 m. As soleiras intrudem predominantemente a Formação Irati, exibindo morfologia lobular plano-paralela com orientação preferencial leste-oeste. O modelo estratigráfico evidenciou o aprofundamento progressivo das unidades sedimentares da Bacia do Paraná em direção à DCRS, além da identificação de paleolineamentos NW-SE no embasamento cristalino que possivelmente condicionaram a ascensão magmática. A metodologia demonstrou eficácia na caracterização tridimensional de sistemas intrusivos complexos, sendo aplicável a áreas análogas com condições mais favoráveis. A correlação espacial entre paleolineamentos, assinatura geofísica e distribuição das soleiras sugere controle estrutural na colocação magmática, constituindo critério promissor para identificação de zonas potenciais em outras porções da Bacia do Paraná.

Palavras-chave: Modelagem geológica 3D; Soleiras basálticas; Armazenamento geológico de CO₂; Depressão Central do Rio Grande do Sul; Província Magmática Paraná-Etendeka.

ABSTRACT

This study presents the 3D geological modeling of basaltic sill complexes in the subsurface of the Central Depression of Rio Grande do Sul (DCRS), aiming to evaluate their potential as reservoirs for geological CO₂ storage. The growing need for implementing Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) technologies to mitigate climate change has driven the investigation of suitable geological formations, among which sill complexes associated with the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP) stand out for their capacity for permanent carbon mineralization. The methodology employed 96 boreholes from the CPRM collection (1980) and aeromagnetic data from the Escudo Sul-Rio-Grandense Aerogeophysical Project (2010), processed through implicit 3D modeling in Leapfrog Geo® software using the FastRBF™ interpolator. The study area, located southeast of Rio Pardo municipality/RS, covers 286 km² and revealed the presence of three main intrusive bodies (Sill A, B and C) with individual thicknesses ranging from 0.4 m to 18 m, distributed at depths of 41 m to 465 m. The largest intrusive body (Sill A) presents dimensions of 12.1 km × 7.7 km, an estimated volume of 664,570,000 m³ and an average thickness of 7.3 m. The sills predominantly intrude the Irati Formation, exhibiting plano-parallel lobular morphology with preferential east-west orientation. The stratigraphic model evidenced the progressive deepening of sedimentary units of the Paraná Basin toward the DCRS, in addition to the identification of NW-SE paleolineaments in the crystalline basement that possibly conditioned magmatic ascent. The developed methodology demonstrated effectiveness in the three-dimensional characterization of complex intrusive systems, being applicable to analogous areas with more favorable conditions. The spatial correlation between paleolineaments, geophysical signature and sill distribution suggests structural control on magmatic emplacement, constituting a promising criterion for identifying potential zones in other portions of the Paraná Basin.

Keywords: 3D geological modeling; Basaltic sills; Geological CO₂ storage; Central Depression of Rio Grande do Sul; Paraná-Etendeka Magmatic Province.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização e acesso da área de estudo.....	19
Figura 2 – Mapa da Depressão Central do Rio Grande do Sul.....	22
Figura 3 – Processo de mineralização de carbono por injeção de CO ₂	31
Figura 4 – Principais ambientes geológicos onde soleiras são encontradas.....	34
Figura 5 – Desenho esquemática: morfologia de soleiras.....	35
Figura 6 – Mapa aeromagnetométrico do extremo sul do Brasil.....	36
Figura 7 – Morfologias de intrusões em sistemas vulcânicos.....	38
Figura 8 – Mapa geológico Cerro do Coronel.....	40
Figura 9 – Gráfico de espaçamento médio entre furos de sondagem.....	48
Figura 10 – Bloco de modelagem geológica 3D.....	49
Figura 11 – Mosaico das soleiras modeladas.....	51
Figura 12 – Modelo 3D do arcabouço estratigráfico.....	53
Figura 13 – Modelo 3D da distribuição das soleiras intrudindo a Fm. Irati.....	54
Figura 14 – Análise comparativa de continuidade e morfologia das soleiras no modelo.....	56
Figura 15 – Modelo e perfis geológicos.....	58
Figura 16 – Modelagem embasamento cristalino.....	60
Figura 17 – Ilustração esquemática sistema de alimentação magmática das intrusões.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coluna estratigráfica.....	29
Tabela 2 – Arquitetura e organização prévia dos furos de sondagem.....	44
Tabela 3 – Dados geométricos das soleiras.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE - Agência Internacional da Energia
ANP – Agência Nacional do Petróleo
BP - Batólito Pelotas
BSG – Bloco São Gabriel
BT - Bloco Taquarembó
BP – Bacia do Paraná
CAC – Captura e Armazenamento de Carbono
CCUS - Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CDF - Cinturão Dom Feliciano
CCSB - Cinturão de Cisalhamento Sul Brasileiro
DCRS – Depressão Central do Rio Grande do Sul
E – Leste
GEE – Gases de Efeito Estufa
GSG – Grupo Serra Geral
FastRBF™ – Função de Base Rápida
FB – Formação Botucatu
FDT - Faixa de Dobramento Tijucas
FE – Formação Esmeralda
FP – Formação Palmas
FT – Formação Torres
FVS – Formação Vale do Sol
IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MDT – Modelos Digitais de Terreno
N – Norte
PMPE - Província Magmática Paraná-Etendeka
SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SSEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SIG – Sistema de Informações Geográficas
S – Sul

TNP - Terreno Nico Pérez

W - Oeste

ZCQSE – Zona de Cisalhamento Quitéria-Serra do Erval

ZCDC - Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	18
1.2 Área de estudo	19
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	21
3.1 Província Magmática Paraná-Etendeka.....	23
3.2 Grupo Serra Geral	23
3.3 Escudo Sul-Rio-Grandense	24
3.3.1 Batólito Pelotas	24
3.3.2 Faixa de Dobramentos Tijucas.....	24
3.3.3 Bloco São Gabriel	25
3.3.3 Bloco Taquarembó	25
3.4 Bacia do Paraná	25
3.4.1 Formação Taciba	26
3.4.2 Formações Rio Bonito e Palermo.....	27
3.4.3 Formação Irati	27
3.4.4 Rio do Rastro	28
4. ESTADO DA ARTE	29
4.1 Fundamentos do Armazenamento Geológico de CO ₂	30
4.1.1 Contexto Global e Necessidades Tecnológicas	30
4.1.2 Mecanismos de Armazenamento em Formações Basálticas	30
4.1.3 Potencial de Armazenamento no Contexto Brasileiro	31
4.1.4 Armazenamento de CO ₂ nos Basaltos do Grupo Serra Geral	32
4.2 Caracterização de Complexos de Soleiras Basálticas.....	33
4.2.1 Morfologia e Geometria dos Complexos Intrusivos	33
4.2.2 Classificação Morfológica das Soleiras	34
4.3 Expressão Geofísica dos Complexos de Soleiras	35
4.4 Magmatismo Intrusivo no Sul do Brasil.....	37
4.5 Cerro do Coronel e Complexo Morungava	39
4.6 Princípios e Aplicações da Modelagem Tridimensional	41
4.7 Aplicações de modelagem 3D em complexos de soleiras	42

5. METODOLOGIA.....	43
5.1 Fonte de dados.....	43
5.2 Análise e organização banco de dados.....	44
5.2.1 Fluxo de trabalho <i>Leapfrog Geo</i> ®.....	45
5.3 Processamento de dados.....	45
5.3.1 Análise e filtragem furos de sondagem.....	45
5.3.2 Importação e análise qualitativa dos furos de sondagem.....	45
5.3.3 Modelagem geológica.....	46
5.3.4 Interpolador <i>FastRBF</i> ™.....	46
5.4 Refinamento e Modelagem geológica.....	47
6. RESULTADOS.....	49
6.1 Domínio soleiras.....	50
6.2 Domínio estratigráfico.....	52
7. DISCUSSÃO.....	54
7.1 Soleiras: geometria, morfologia e controles.....	54
7.2 Arcabouço estratigráfico.....	57
7.3 Paleolineamentos no embasamento, associados a zonas alimentadoras de soleiras em bacias sedimentares.....	59
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
9. REFERÊNCIAS.....	64
10. APÊNDICES.....	73

1. INTRODUÇÃO

As elevadas taxas de emissão de CO₂ antropogênico colocadas na atmosfera nas últimas décadas provocaram mudanças climáticas irreversíveis ao nosso planeta. Em 2022 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (PIMC), reconhecido pelo acrônimo inglês IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Changes*) como órgão das Nações Unidas (ONU) para avaliar a ciência relacionada às mudanças climáticas, indicou que reduções significativas das emissões de gases do efeito estufa (GEE) são necessárias para a desaceleração destas mudanças e diminuição de danos futuros (Hepple & Benson, 2005). O PIMC incentiva, além da redução da emissão direta dos GEE, o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de retirar, reutilizar e armazenar o CO₂ antropogênico presente ou em rota para a atmosfera. Estes métodos são referidos de forma genérica como Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono ou pelo acrônimo inglês CCUS (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*) e representam uma alternativa essencial para o alcance dos objetivos climáticos e energéticos em busca de uma neutralidade em emissões de GEE. De acordo com as projeções do PIMC, a partir de 2050 será necessário capturar 20 Gt CO₂ anualmente para atingir a neutralidade de carbono, devido a alteração significativa na composição da atmosfera, aumentando a temperatura média mundial entre 1,1 e 1,2°C (Lee et al., IPCC, 2023).

Neste contexto, o uso de formações geológicas profundas, como jazidas de óleo e gás exauridas, campos de derrames basálticos e intrusões basálticas em subsuperfície, apresenta-se como uma solução promissora para o armazenamento de CO₂ (Pelissari, 2022). Na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul (DCRS), evidências de anomalias magnéticas apontam para a presença de complexos de soleiras em subsuperfície, associados à Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), cuja porção brasileira corresponde estratigraficamente ao Grupo Serra Geral (GSG) (Simões et al., 2022; Rossetti et al., 2018), conferindo elevado potencial de estudo como reservatórios análogos para o armazenamento de CO₂. No entanto, o conhecimento sobre a ocorrência e a distribuição lateral dessas intrusões em subsuperfície permanece limitado, o que representa um obstáculo na caracterização de reservatórios análogos.

A modelagem geológica 3D como produto da interpolação de furos de sondagem, surge como uma ferramenta robusta para superar essas limitações em

bacias *onshore* e *offshore*, permitindo uma análise mais detalhada do arcabouço geológico do complexo intrusivo presente na área de estudo. Dessa forma, este estudo tem como propósito desenvolver a modelagem implícita 3D de corpos intrusivos, utilizando-os como estudo de caso para áreas análogas inseridas em zonas potenciais para a injeção de CO₂ na DCRS, além de contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre a arquitetura intrusiva que alimentou as lavas do GSG.

1.1 Justificativa

O presente trabalho justifica-se devido ao conhecimento limitado da geometria, distribuição espacial das soleiras e o arcabouço estrutural que controla essas intrusões. Atualmente, a localização e extensão dessas formações são apenas inferidas a partir de anomalias magnéticas identificadas pelo levantamento do Projeto Aerogeofísico ESRG, realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2010). Utilizando do acervo de testemunhos de sondagem para carvão disponibilizados pelo (SGB) Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 1980) a aplicação deste banco de dados, viabiliza a geração de modelos geológicos 3D, justificando a exequibilidade do projeto.

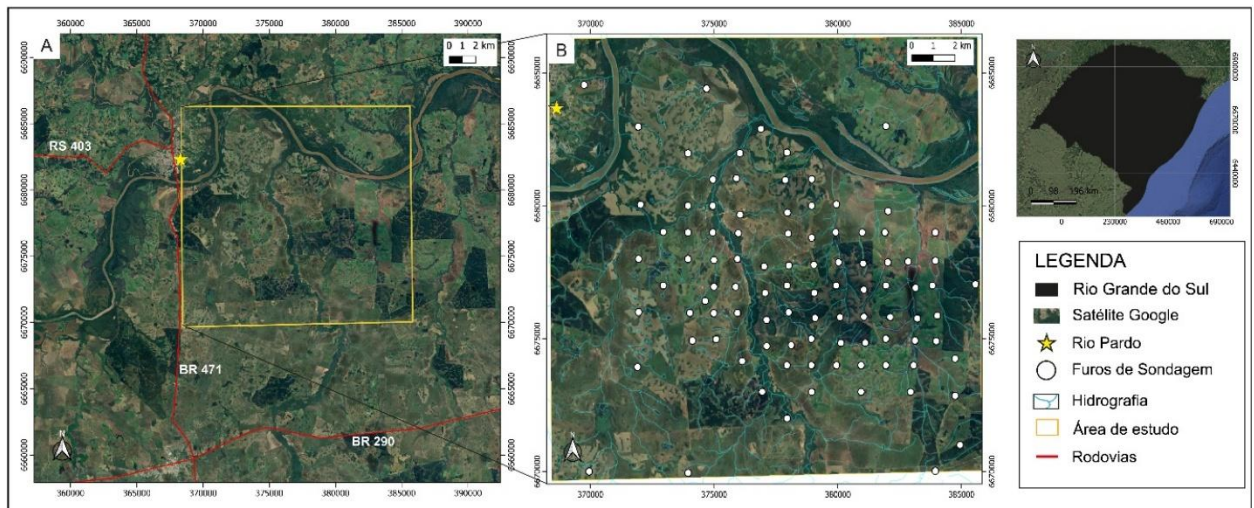
Como exemplo, estudos análogos e modelagem geológica 3D de soleiras em áreas próximas caracterizaram a distribuição subsuperficial de intrusões vulcânicas (Araújo et al. 2023), garantindo que a modelagem 3D é uma ferramenta eficaz e viável para a caracterização desses corpos vulcânicos, aplicando metodologias semelhantes para um maior detalhamento das estruturas e litologias da região estudada.

A modelagem 3D de complexos de soleiras para avaliação de potencial de armazenamento de CO₂ representa aplicação inovadora dessa tecnologia. A caracterização tridimensional da geometria, conectividade e propriedades petrofísicas das soleiras permite identificação de volumes adequados para injeção de CO₂ e avaliação da capacidade de armazenamento. Esta abordagem é particularmente relevante para os complexos de soleiras da DCRS, onde a distribuição e conectividade desses corpos ainda são pouco conhecidas.

1.2 Área de estudo

A área de investigação situa-se na DCRS, mais precisamente no setor sudeste do município de Rio Pardo (Fig.1), a aproximadamente 115 km da capital Porto Alegre. O acesso à região é estabelecido por meio de duas rotas principais: a primeira consiste no deslocamento pela rodovia federal BR-290, com posterior interseção na BR-471; a segunda alternativa compreende o trajeto pela rodovia estadual RS-403, ambas proporcionando conectividade adequada para as atividades de pesquisa na área delimitada para este estudo.

Figura 1 - A) Mapa de localização e acesso da área de estudo com base no sistema de coordenadas geográficas: datum WGS 84 zona 22S, base cartográfica Google Satélite (2025). B) Mapa em escala de detalhe da área de estuda, com base hidrográfica Hasenack e Weber (2010) e furos de sondagem SGB (CPRM, 1980).



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral, esta pesquisa visa gerar um modelo 3D como estudo de caso, que contemple a geometria, arcabouço estratigráfico, superfícies e volumes das soleiras dos complexos intrusivos localizados na poligonal de estudo, na DCRS.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

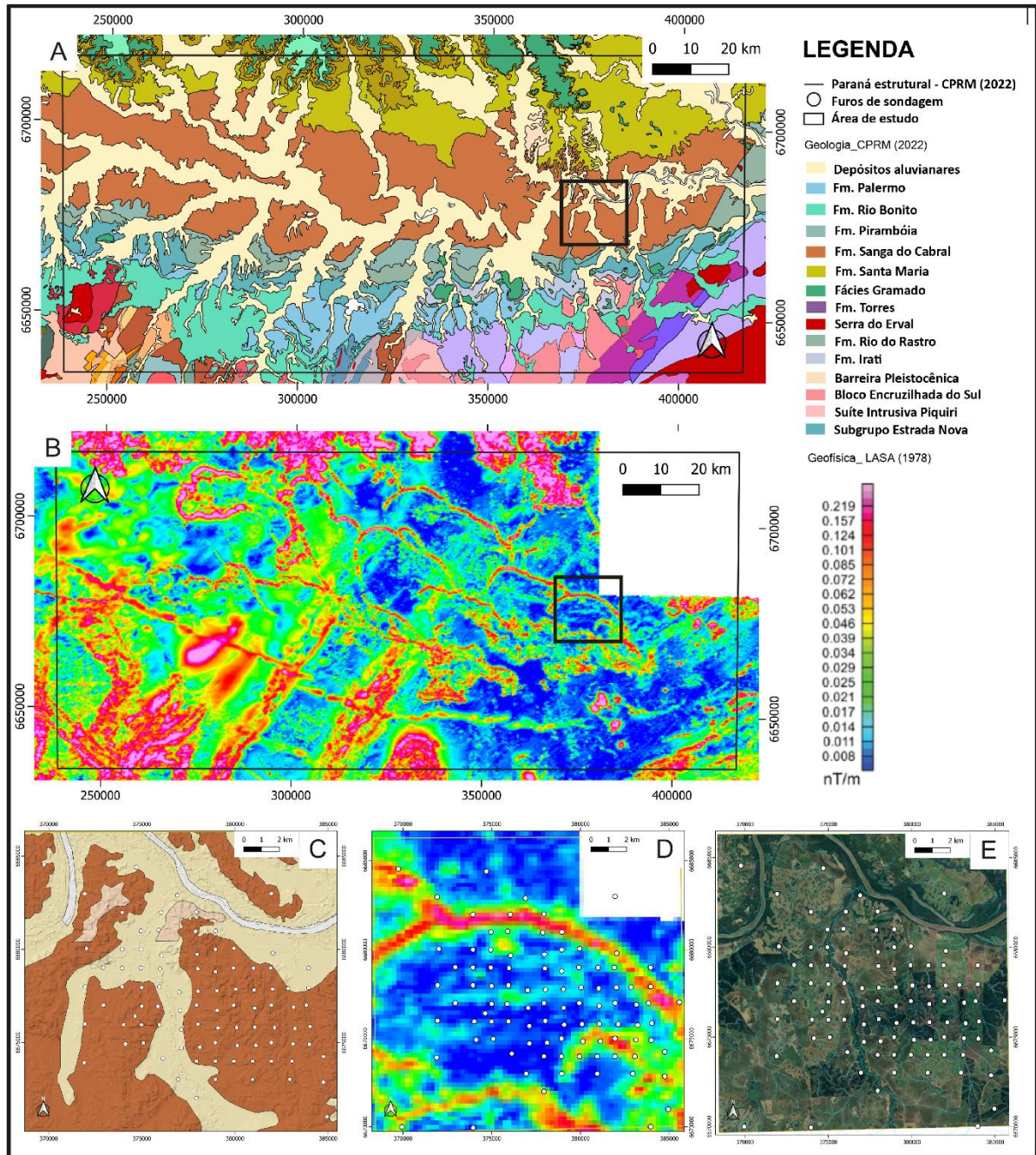
1. Revisar os dados geológicos, geofísicos e estruturais disponíveis na literatura e elaborar uma plataforma de dados em sistema de informações geográficas compatível com o *Leapfrog Geo*®;
2. Validar os dados geológicos de subsuperfície, fornecidos por testemunhos de sondagem, e comparar com dados de aeromagnetometria;
3. Gerar um modelo geológico 3D, e obter dados de geometria, espessura e volume e avaliar a interconectividade de soleiras, sua disposição lateral e sua continuidade;
4. Avaliar a eficácia da modelagem geológica 3D implícita no *Leapfrog Geo*® com dados qualitativos e semi-quantitativos, na caracterização e dimensionamento geométrico de intrusões doleríticas.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Depressão Central do Rio Grande do Sul (DCRS), enquanto contexto deste estudo, constitui uma região de baixas altitudes onde afloram rochas sedimentares da Bacia do Paraná (Fig. 2). Estas rochas sedimentares são encaixantes de um extenso e complexo sistema de rochas intrusivas, composto por soleiras e corpos circulares, distribuídas ao longo de aproximadamente 8.600 km² (Simões et al., 2022; Sarmiento et al., 2014). As principais unidades sedimentares encaixantes correspondem às formações Taciba, Rio Bonito, Palermo, Irati, Rio do Rastro, Sanga do Cabral, Pirambóia e a Supersequência Santa Maria pertencentes à sucessão estratigráfica da Bacia do Paraná.

A norte da DCRS encontra-se o planalto sul rio grandense que abriga as sequências vulcânicas do Grupo Serra Geral (GSG) com ocorrência no Cretáceo (Rosseti, et al., 2021) que registra volumosos derrames que compõe a Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE). A sul, a DCRS é limitada pelo Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), onde predominam rochas graníticas e metamórficas de idade Paleo a Neoproterozoica da Província Mantiqueira (Pessano et al., 2021). Intrusões doleríticas também são observadas cortando o embasamento cristalino, particularmente na região do Cerro do Coronel (Sarmiento et al., 2014), demonstrando que o magmatismo associado à PMPE não se restringiu aos estratos sedimentares, mas também afetou as rochas do embasamento. Esta configuração geológica confere à região uma complexidade estrutural e litológica, com interfaces entre rochas sedimentares, ígneas intrusivas e o embasamento cristalino.

Figura 2 – Mosaico de mapas com sistema de coordenadas: Datum WGS 84 - zona 22S. A) Mapa geológico (SGB/CPRM, 2022), da Depressão Central do Rio Grande do Sul. B) Projeto Aerogeofísico Escudo Sul Rio-grandense (CPRM, 2010), mapa do sinal analítico de magnetometria da região sul do Rio Grande do Sul. C) Mapa geológico (SGB/CPRM, 2022) da área de estudo, com furos de sondagem SGB (CPRM, 1980). D) Mapa do sinal analítico de magnetometria da área de estudo, com furos de sondagem SGB (CPRM, 1980). E) Mapa em escala de detalhe da área de estuda, com base hidrográfica Hasenack e Weber (2010) e furos de sondagem SGB (CPRM, 1980).



3.1 Província Magmática Paraná-Etendeka

A Província Magmática Paraná-Etendeka foi formada durante um evento vulcano-plutônico de dimensões continentais que ocorreu no Cretáceo Inferior, precedendo a abertura do Oceano Atlântico Sul (Peate, 1992). Com duração curta de aproximadamente 135 a 131 Ma (Polo et al., 2014) a PMPE abrangeu áreas continentais com volume estimado em 1.700.000 km², com registros no leste da África (Namíbia e Angola) e na América do Sul: Argentina, Paraguai, Uruguai e Brasil (Frank et al., 2009). Os derrames tem características bimodais em relação ao conteúdo de SiO₂, com predomínio de rochas de composição básica e intermediária (97,5%), basaltos toleíticos e andesitos basálticos, sobre as de composição ácida (2,5%), dacitos e riolitos. Grupos de rocha com base nos padrões geoquímicos e estratigrafia regional, são regionalmente divididos como rochas de alto-Ti ao norte, e rochas de baixo-Ti ao sul (Peate, 1992).

Esse evento foi caracterizado pelo derrame e acúmulo de grandes volumes de rochas vulcânicas, além da formação de corpos intrusivos destacando-se complexos intrusivos de soleiras e enxames de diques (Araújo, 2023). Na porção Sul-americana a PMPE se encontra na bacia do Chaco-Paraná, e foram agrupadas estratigraficamente no Brasil como Grupo Serra Geral (Rossetti et al., 2018).

3.2 Grupo Serra Geral

A evolução GSG encontra-se associada à Supersequência Gondwana III da Bacia do Paraná (Milani, 1997), abrangendo uma área de aproximadamente 800.000 km² em território brasileiro, com sequências vulcânicas que atingem espessuras de até 1.700 m na porção central da bacia (Frank et al., 2009). A formalização estratigráfica do GSG, proposta por Rossetti et al. (2018), baseou-se na sucessão vulcânica e estabeleceu quatro unidades de derrames distintas, organizadas da base para o topo: Formação Botucatu (FB) sedimentar com regime deposicional eólico. A Formação Torres (FT) corresponde à unidade basal do empilhamento vulcânico, sendo caracterizada por derrames *pahoehoe* simples e compostos, frequentemente associados a processos de interação vulcano-sedimentar, especialmente em contato direto com os depósitos eólicos da FB. Formação Vale do Sol (FVS) - derrames do tipo *rubbly pahoehoe* indicando variações nas condições de extrusão e resfriamento das lavas. Formação Palmas (FP) - derrames de rochas silícicas com espessuras

variadas e volume estimado de 20.000 km³. E no topo da sucessão, a Formação Esmeralda (FE) é caracterizada por derrames *pahoehoe* simples e compostos, marcando as fases finais da atividade vulcânica do grupo.

3.3 Escudo Sul-Rio-Grandense

O Sistema Orogênico Mantiqueira corresponde à maior porção da província geomorfológica conhecida como Escudo Sul Rio Grandense (ESRG), proposta por Carvalho (1932). Com intuito de evitar confusões sobre terminologia, a nomenclatura nesta seção foi incorporada pela revisão (De Toni et al., 2024). A evolução desse escudo está diretamente relacionada a dois eventos orogênicos de grande escala: o ciclo Transamazônico, ocorrido entre 2,26 e 2,00 Ga, e o ciclo Brasileiro/Panafricano, ativo entre 900 e 535 Ma, conforme sintetizado por Hartmann et al. (2007). A atuação sucessiva desses ciclos moldou e reconfigurou extensas áreas da crosta continental, culminando na consolidação do ESRG. Segundo Hartmann et al. (2007), o escudo pode ser segmentado conforme suas características geológicas, litológicas, geotectônicas e isotópicas. Esses domínios se distribuem de sul para norte e representam a diversidade interna do conjunto cratônico.

3.3.1 Batólito Pelotas

O Batólito Pelotas ocupa a faixa leste do ESRG e é limitado a oeste pela Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu (ZCDC), que o separa da Faixa de Dobramentos Tijucas (FDT). De acordo com Philipp et al. (2002), trata-se de um conjunto predominantemente granítico composto por um complexo e seis suítes intrusivas, marcado pela presença de enclaves máficos e por xenólitos de gnaisses tonalíticos e de rochas metas sedimentares. Para Bitencourt e Nardi (2000) o magmatismo do batólito é resultado de um contexto pós-colisional, no qual os corpos graníticos foram intrudidos ao longo de zonas de cisalhamento com cinemática essencialmente transcorrente.

3.3.2 Faixa de Dobramentos Tijucas

A Faixa de Dobramentos Tijucas encontra-se imediatamente a oeste do Batólito Pelotas, tendo a Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu como limite entre ambos. Seu contato com o Bloco São Gabriel é encoberto por unidades vulcânicas e

sedimentares da Bacia do Camaquã (Hartmann et al., 2007). Conforme sintetizado por Chemale Jr. (2000), o terreno é constituído por duas unidades metamorfizadas nas fácies xisto verde a anfibolito: Complexo Encantadas e Complexo Porongos.

Segundo Chemale Jr. (2000), dados isotópicos e geoquímicos dessas unidades apontam para o retrabalhamento de um embasamento pré-brasiliano, sugerindo que a deposição ocorreu sobre crosta continental adelgada ou no contexto de um arco magmático continental que reutilizou crosta Paleoproterozóica.

3.3.3 Bloco São Gabriel

O Bloco São Gabriel, conforme descrito por Hartmann et al. (2007), reúne rochas metavulcânicas e meta vulcanoclásticas, gnaisses cálcio-alcinos, além de associações interpretadas como remanescentes de ofiolitos. Estudos petrológicos, estruturais e isotópicos indicam que esse é o único terreno neoproterozóico de caráter juvenil reconhecido no setor sul da Província Mantiqueira (Heilbron et al., 2010). Sua evolução está relacionada à formação de um prisma acrescionário neoproterozóico, que incorporou ambientes típicos de margens passivas, sistemas *back-arc*, sequências ofiolíticas e complexos plutônicos e vulcano sedimentares associados a arcos magmáticos (Hartmann et al., 2007).

3.3.3 Bloco Taquarembó

O Bloco Taquarembó ocupa a extremidade oeste do ESRG, tendo o Lineamento de Ibaré como limite estrutural em relação ao BSG. Para Hartmann et al. (2007), esse domínio geológico é constituído por granulitos de idade paleoproterozóica associados a granitos neoproterozóicos, características que sustentam sua interpretação como um bloco derivado do Cráton Rio de La Plata.

3.4 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná constitui uma das mais extensas bacias intracratônicas da América do Sul, ocupando aproximadamente 1.500.000 km² (Milani et al, 1997) distribuídos entre Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, com uma pequena porção correlata na África denominada Huab, na Namíbia (Jerram et al., 2015). Sua evolução geológica abrange um intervalo temporal do Ordoviciano ao Cretáceo, tendo sido subdividida por Milani & Ramos (1997) em seis supersequências deposicionais de

segunda ordem: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Cada uma dessas supersequências representa ciclos transgressivo-regressivos controlados por variações eustáticas e subsidência tectônica, registrando diferentes contextos paleoambientais ao longo da história da bacia.

A configuração estrutural da BP é fortemente influenciada pelas estruturas do embasamento pré-cambriano subjacente, particularmente por grandes zonas de cisalhamento com orientação preferencial NE-SW (Holz et al., 2006). Esse arcabouço estrutural herdado condicionou a formação de feições tectônicas intra-baciais de grande escala, incluindo arcos e calhas que compartimentaram a sedimentação ao longo de sua evolução. Adicionalmente, Zalán et al. (1987) identificaram três sistemas principais de lineamentos que afetam a bacia: NE-SW (paralelos às zonas de cisalhamento do embasamento), NW-SE (associados a fraturas e falhas extensionais) e E-W. Estes lineamentos não apenas controlaram a subsidência diferencial e a arquitetura deposicional, mas também influenciaram posteriormente a colocação de intrusões magmáticas da PMPE durante o Cretáceo Inferior.

Na DCRS, a sequência estratigráfica da Bacia do Paraná inclui diversas formações sobrepostas ao embasamento cristalino, representando um registro sedimentar que se estende do Paleozoico ao Mesozoico. Estas unidades constituem o arcabouço sedimentar hospedeiro do complexo de soleiras investigado neste trabalho e serão detalhadas a seguir:

3.4.1 Formação Taciba

A Formação Taciba representa uma sequência sedimentar com aproximadamente 150 metros de espessura, registrando a sedimentação glacial do Carbonífero-Permiano na Bacia do Paraná (Mottin & Vesely, 2021). A arquitetura estratigráfica desta unidade caracteriza-se por uma organização vertical em dois grandes intervalos com padrões granulométricos contrastantes. Segundo Mottin & Vesely (2021) o intervalo basal exibe um padrão de granodecrescência ascendente, iniciando com depósitos mais grossos que transicionam para sedimentos progressivamente mais finos, culminando em um pacote de diamictitos no topo. Estes diamictitos, caracterizados pela matriz lamítica com clastos dispersos de composição

e granulometria variadas, são interpretados como depósitos glaciais diretos ou produtos de fluxos gravitacionais glacialmente influenciados.

Sobrepondo-se a este conjunto, desenvolve-se uma sucessão intermediária com padrão inverso de granocrescência ascendente, na qual lamitos basais são gradualmente substituídos por arenitos em direção ao topo (Mottin & Vesely, 2021). Esta mudança no padrão de empilhamento reflete variações na dinâmica deposicional, possivelmente relacionadas a avanços e recuos glaciais ou mudanças no nível relativo do mar.

3.4.2 Formações Rio Bonito e Palermo

As formações Rio Bonito e Palermo registram a sucessão deposicional pós-glacial do Permiano Inferior na Bacia do Paraná, marcando a transição de sistemas continentais para marinhos durante a Supersequência Gondwana I (Milani, 1997). A Formação Rio Bonito caracteriza-se pela predominância de arenitos de origem fluvial intercalados com pelitos, refletindo ambientes deposicionais variados que incluem sistemas fluviais, deltaicos e lagunares. Esta unidade é particularmente relevante por conter camadas espessas de carvão, formadas em ambientes pantanosos de planície costeira com elevada preservação de matéria orgânica vegetal.

Estratigraficamente sobreposta, a Formação Palermo é composta por siltitos e argilitos de granulação fina, interpretados como depósitos de plataforma marinha rasa que representam o trato de máxima inundação da Supersequência Gondwana I (Milani, 1997). Esta formação registra condições transicionais entre ambientes marinhos rasos e lagunares, caracterizados por baixa energia hidrodinâmica.

3.4.3 Formação Irati

Para Milani (2007) a Formação Irati, de idade kazaniana (Permiano Inferior), apresenta variações faciológicas marcantes ao longo da Bacia do Paraná. Na porção sul da bacia, incluindo a área de estudo na Depressão Central do Rio Grande do Sul, predominam pelitos, margas e folhelhos betuminosos, enquanto na porção norte ocorrem ritmitos calcário-pelíticos com níveis subordinados de evaporitos. Estas variações litológicas refletem diferenças nas condições paleoambientais de um sistema marinho restrito, interpretado como um mar epicontinental com circulação limitada e alta taxa de preservação de matéria orgânica (Santos Neto, 1992).

No contexto deste estudo, a Fm. Irati constitui uma das principais unidades encaixantes do complexo de soleiras investigado, conforme evidenciado pelo contato basal das intrusões do Cerro do Coronel com esta formação (Sarmiento, 2014). A interação térmica entre as soleiras cretáceas e os folhelhos betuminosos alterou localmente o grau de maturação da matéria orgânica (Souza, 2004), tema relevante para a compreensão dos mecanismos de colocação das intrusões em níveis estratigráficos específicos.

3.4.4 Rio do Rastro

A Formação Rio do Rastro, do Permiano Superior, é composta de siltitos, arenitos finos e alguns carbonatos, representando depósitos de ambientes de transição, incluindo lacustres e de planícies costeiras, com influência de processos eustáticos. Esta formação registra variações significativas no nível do mar e é rica em fósseis de plantas, indicando um clima úmido e influências de bacias lacustres de baixa energia. A Fm. Rio do Rastro representa a seção superior do ciclo regressivo do Permo-Triássico na Bacia do Paraná. Segundo Milani & Ramos (1997) nesse período, a subsidência da bacia era fortemente influenciada pelos esforços relacionados à junção do terreno Patagônico, em decorrência do orógeno San Rafael. A limitação da abertura da bacia para o oceano Pantalassa, devido ao levantamento de cordilheiras nas bordas da placa, resultou na formação de um grande corpo aquático restrito, de baixa profundidade e sem talude.

A elevada taxa de sedimentação que esse mar epicontinental experimentou levou à progradação e à continentalização definitiva dos sistemas deposicionais na transição Tatariano-Scythiano. Segundo Warren (2008) a formação é subdividida em dois membros: o Serrinha (inferior) e o Morro Pelado (superior). O membro Serrinha é caracterizado pela alternância de fácies pelíticas, heterolíticas, fácies de arenitos finos maciços com laminação cruzada de baixo ângulo e, principalmente, fácies formadas sob a influência de ondas de tempestade.

O membro Morro Pelado é composto principalmente por corpos de arenitos finos de espessura variável, com geometrias tabulares, lenticulares ou lobadas, que se interdigitam lateralmente com camadas tabulares de siltitos e argilitos avermelhados. Arenitos tabulares de espessura decimétrica a métrica, representam continuidade lateral dos corpos lenticulares e sigmoidais, intercalando-se aos siltitos.

Esses níveis frequentemente preservam fósseis de plantas higrófilas e estruturas semelhantes a gretas de contração, indicativas de exposição subaérea. As porções superiores da unidade incluem depósitos de canais distributários, marcados por arenitos lenticulares com bases erosivas, associados a depósitos de dunas e lençóis eólicos, que registram a transição para os depósitos predominantemente eólicos da Formação Pirambóia (Warren et al., 2008).

Tabela 1 – Coluna estratigráfica interceptada nos furos de sondagem, com padrão cromático adaptado.

Período	Unidade estratigráfica
Cretáceo	Grupo Serra Geral (vulcânicas e intrusivas)
Permiano	Fm. Rio do Rastro
	Fm. Estrada Nova
	Fm. Irati
	Fm. Palermo
	Fm. Rio Bonito
Carbonífero	Grupo Itararé
Proterozóico	Embasamento (ESRG)

4. ESTADO DA ARTE

Segundo Raza (2022) o sequestro geológico de CO₂ representa uma promissora estratégia para mitigação da emissão de gases de efeito estufa, especialmente quando aplicado em formações basálticas que apresentam características favoráveis à mineralização permanente e sem vazamento do carbono. Embora esse método seja conhecido há muito tempo, apenas dois projetos piloto praticaram a injeção de CO₂ em basaltos, localizados na Islândia e nos Estados Unidos. A limitação da implementação dessa técnica é associada principalmente aos desafios e complexidades das interações à rápida mineralização de carbono, e a falta de estudos e novas tecnologias sobre capacidade de reservatório de armazenamento de CO₂ (Raza, 2022). Na região da DCRS, os complexos de soleiras associados à PMPE constituem alvos promissores para essa aplicação, demandando ferramentas de modelagem 3D para caracterização adequada de sua geometria e potencial de

armazenamento. Esta revisão bibliográfica estrutura-se em três eixos fundamentais que sustentam o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 Fundamentos do Armazenamento Geológico de CO₂

4.1.1 Contexto Global e Necessidades Tecnológicas

As mudanças climáticas, impulsionadas por emissões elevadas de gases de efeito estufa (GEE), demandam soluções tecnológicas que permitam a redução das concentrações atmosféricas de CO₂. De acordo com Mussarra et al. (2022), as tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CAC) surgem como alternativas fundamentais para cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris (2016). A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que essas tecnologias poderiam evitar até 100 Gt de CO₂ até 2050, representando aproximadamente 14% da redução necessária nas emissões atmosféricas até esse período (AIE, 2019).

O processo de armazenamento geológico de CO₂ envolve a captura do gás de fontes estacionárias, como usinas termoelétricas e indústrias de cimento, seguida de separação, desidratação, compressão e transporte para locais adequados de armazenamento permanente. Raza (2022) contextualiza os diversos mecanismos e desafios técnicos envolvidos neste processo, destacando a necessidade de implementação de mecanismos ativos de captura para minimizar riscos de vazamentos e garantir a eficácia logística, e do armazenamento a longo prazo.

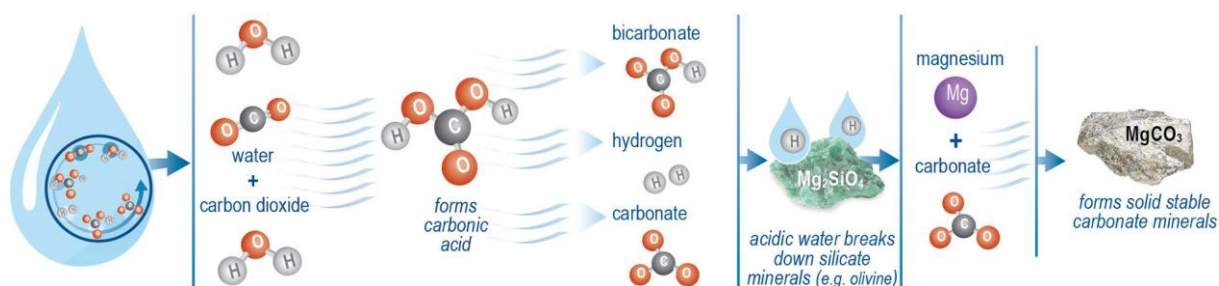
4.1.2 Mecanismos de Armazenamento em Formações Basálticas

A mineralização de carbono emerge como técnica promissora para o armazenamento permanente de CO₂ em rochas reativas, como basaltos e doleritos. Embora conhecida há décadas, apenas dois projetos-piloto, localizados na Islândia (projeto CarbFix) e nos Estados Unidos (projeto Wallula), realizaram injeção de CO₂ em basaltos (Raza et al., 2022). Esta limitação relaciona-se principalmente à complexidade das interações químicas, à rápida mineralização do carbono, à dificuldade de estimativa da capacidade de armazenamento a longo prazo (Raza et al., 2022).

Os basaltos ou rochas ultramáficas apresentam composição mineral compatível com a mineralização de CO₂, caracterizando-se pelo alto teor de cátions

divalentes, composição mineral (piroxênios e olivina) e alta reatividade (Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Em condições favoráveis para a aplicação da injeção, o processo de mineralização inicia-se com a dissolução do CO_2 na água e formação de ácido carbônico, em função da pressão, temperatura e salinidade (Fig. 3). O ácido carbônico reduz o pH da água *in situ* (Matter et al., 2009) e aumenta sua reatividade. Os íons H^+ atacam o vidro basáltico e dissolvem os minerais primários da matriz rochosa, liberando cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+}) para a solução (Goldberg et al., 2008). Os cátions divalentes reagem posteriormente com o CO_2 dissolvido, formando minerais de carbonato estáveis como calcita, magnesita e siderita (Raza et al., 2022). Adicionalmente, a estrutura vesicular porosa nos topos de derrames basálticos favorece a injeção e a rápida mineralização do carbono, promovendo o aprisionamento mineral eficiente, porém Zakharova et al., (2020) argumenta sobre incertezas associada a injeção por questões técnicas como profundidade, estrutural com fraturas fechadas e alta probabilidade de reativação de falhas.

Figura 3 - Processo de mineralização de carbono por injeção de CO_2 em formações basálticas com olivina. Retirado: (Sandalow et al., 2021)



4.1.3 Potencial de Armazenamento no Contexto Brasileiro

As regiões sul e sudeste do Brasil concentram algumas das maiores fontes de emissão de CO_2 estacionárias do país, com taxas locais atingindo 14.000 kt/ano (Rockett et al., 2011). Dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) indicam emissões totais nessas regiões de até 420 Mt/ano, sendo mais da metade proveniente de usinas termelétricas, além de significativa parcela das indústrias de aço e cimento, totalizando mais de 3.000 kt CO_2 /ano (SEEG, 2018, 2019).

Entre os principais tipos de reservatórios descritos na literatura para armazenamento de CO₂, destacam-se reservatórios de petróleo e gás esgotados, camadas de carvão, aquíferos salinos, xistos negros e rochas máficas e ultramáficas, especialmente basaltos (IPCC, 2005). Segundo a pesquisa do IPCC (2005), as bacias sedimentares mais adequadas para armazenamento de CO₂ apresentam características estruturais simples, sedimentação espessa, formações rochosas permeáveis e camadas de baixa permeabilidade que atuam como barreiras selantes.

A Bacia do Paraná possui condições favoráveis para armazenamento de CO₂ gerado regionalmente. Ketzer et al., 2007 e Pelissari et al., 2021 estimam capacidade de armazenamento nos aquíferos salinos da bacia de até 462.000 Mt, além de cerca de 200 Mt nas camadas de carvão, ressaltando o grande potencial dos basaltos da região. Esses trabalhos identificaram cinco formações geológicas principais com potencial de armazenamento: carvão e aquíferos salinos sobre arenitos da Formação Rio Bonito e Grupo Itararé; Xistos negros das Formações Irati e Ponta Grossa; e basaltos do Grupo Serra Geral.

4.1.4 Armazenamento de CO₂ nos Basaltos do Grupo Serra Geral

O GSG é composto predominantemente (97%) por rochas de composição basáltica (Melfi, 1988) e destaca-se como unidade promissora para armazenamento de CO₂ devido à sua capacidade de reação com CO₂ na presença de água, formando carbonatos por meio de reação contínua. Este processo proporciona aprisionamento permanente e eficiente do gás, considerado uma das formas mais seguras de armazenamento de CO₂ (Bachu, 2007; Matter et al., 2016). As águas cálcicas presentes na região desempenham papel crucial, auxiliando na disponibilidade de íons necessários para as reações de mineralização e potencializando a eficiência do armazenamento (Pelissari et al., 2021).

Carneiro et al. (2013) estimam potencial considerável do Grupo Serra Geral para armazenamento de CO₂, com aproximadamente 270 Mt de CO₂ por ano. Contudo, o armazenamento em larga escala em rochas vulcânicas ainda se encontra em fase de viabilização e demonstração, necessitando estudos adicionais para implementação em grande escala.

4.2 Caracterização de Complexos de Soleiras Basálticas

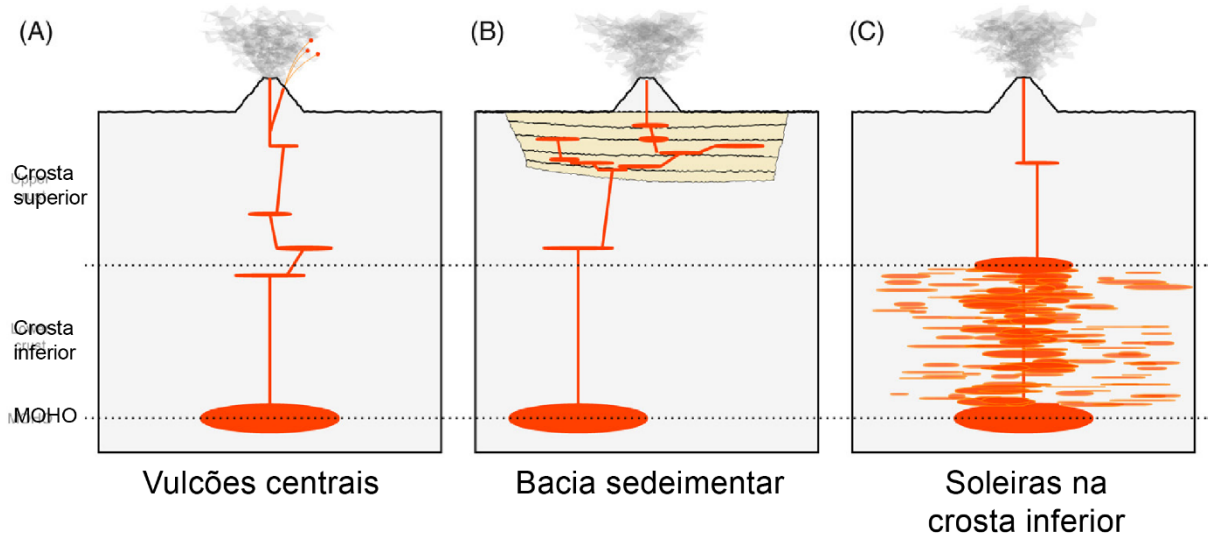
4.2.1 Morfologia e Geometria dos Complexos Intrusivos

Os sistemas de transporte de magma em ambientes vulcânicos compõem-se por diversos elementos com diferentes formas (Fig. 4): diques, cones, soleiras e intrusões mais robustas, como lacólitos, *plugs* e plútons (Burchardt, 2018). Embora os diques sejam tradicionalmente considerados principais vias de ascensão magmática da crosta inferior até a superfície terrestre, estudos recentes enfatizam a importância das soleiras ígneas nos sistemas de canalização vulcânica (Planke et al., 2005). Magee et al. (2016) demonstra que as soleiras desempenham papel crucial no transporte e armazenamento lateral de magma em diferentes níveis da crosta terrestre.

As intrusões tabulares, classificadas como soleiras, diques e lacólitos, atuam como condutos ou reservatórios elementares de magma na crosta. As soleiras, encontradas predominantemente em estratos sedimentares, apresentam disposição sub-horizontal, embora em sequências sedimentares deformadas possam apresentar inclinações variadas, chegando à posição vertical (Galland et al., 2018; 2019).

A morfologia e tamanho dessas intrusões são influenciados por fatores internos (propriedades do magma: densidade, viscosidade, volume e taxa de ascensão) e externos (características das rochas encaixantes: propriedades mecânicas, presença de heterogeneidades ou descontinuidades, profundidade crustal, configuração do relevo e proximidade de cargas topográficas) (Araújo, 2023).

Figura 4 – Principais ambientes geológicos onde as soleiras são encontradas: (A) vulcões centrais, como em rifts vulcânicos e ilhas oceânicas, (B) bacias sedimentares e (C) a crosta inferior estratificada. Retirado: Gaaland (2018).

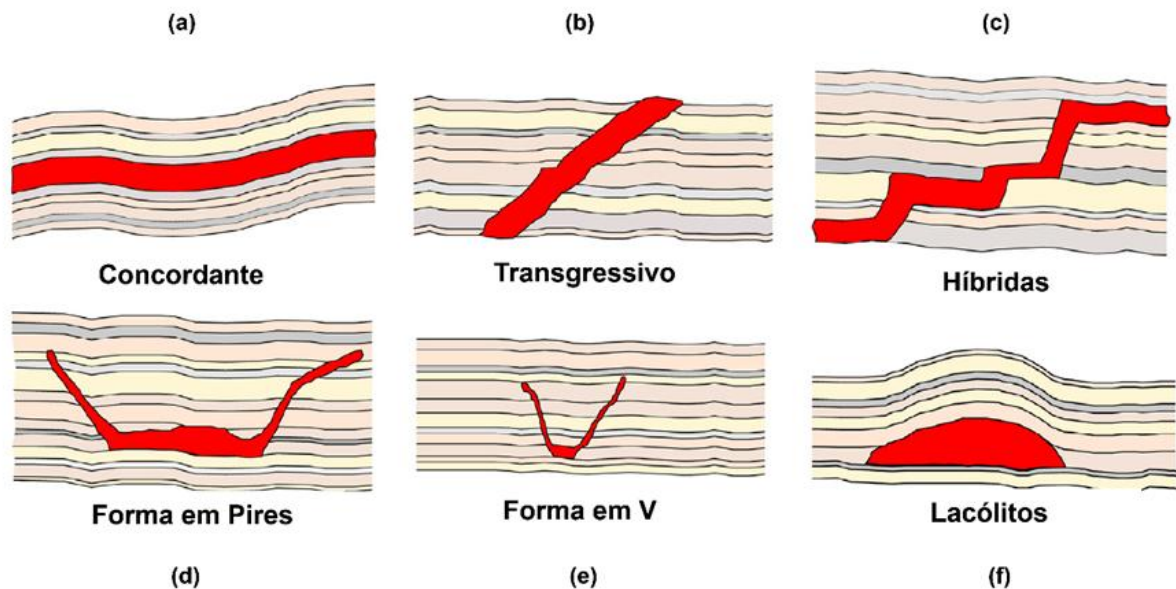


4.2.2 Classificação Morfológica das Soleiras

Gaaland (2018) identifica segmentos morfológicos distintos para corpos intrusivos (Fig.5): (a) intrusão concordante com forma laminar, respectiva à estratificação; (b) intrusão transgressiva, que cortam ou se deslocam transversalmente para níveis estratigráficos superiores; (c) soleiras híbridas com características mistas de intrusões transgressivas e concordantes, assumindo variações em forma de pires e V; (d) intrusão em forma de pires (*“saucer-shaped”*), caracterizada por soleira interna concordante na parte inferior, camada transgressiva ascendente em direção a folhas inclinadas externas, aplainando-se ao alcançar soleiras externas com certa simetria, geralmente apresentando maior espessura central e afinamento nas extremidades; (e) intrusões em forma de V, semelhantes às soleiras em forma de pires, mas com soleiras internas de extensão limitada, predominando placas inclinadas, formando-se tipicamente em níveis crustais superficiais; (f) lacólitos, com contato basal concordante aos estratos subjacentes e frequentemente plano, onde pressão e volume magmáticos elevados forçam as rochas superiores, resultando em teto abobadado. A relação entre espessura (T) e extensão lateral (L) das intrusões tabulares oferece insights sobre mecanismos e crescimento desses corpos (Magee et al., 2017;2019).

Cruden; Mccaffre; Bunge (2017) elucidam que essa relação segue lei de potência ($T = bL^a$), onde "a" representa o expoente e "b" uma constante. Esta relação apresenta duas tendências: uma para diques e soleiras, com expoente próximo a 0,5, indicando crescimento horizontal dominante; outra para lacólitos, com expoente maior, onde o espessamento vertical é mais significativo. Soleiras apresentam extensões laterais superiores aos lacólitos na mesma faixa de espessura, enquanto diques são mais finos, apresentando maior razão L/T.

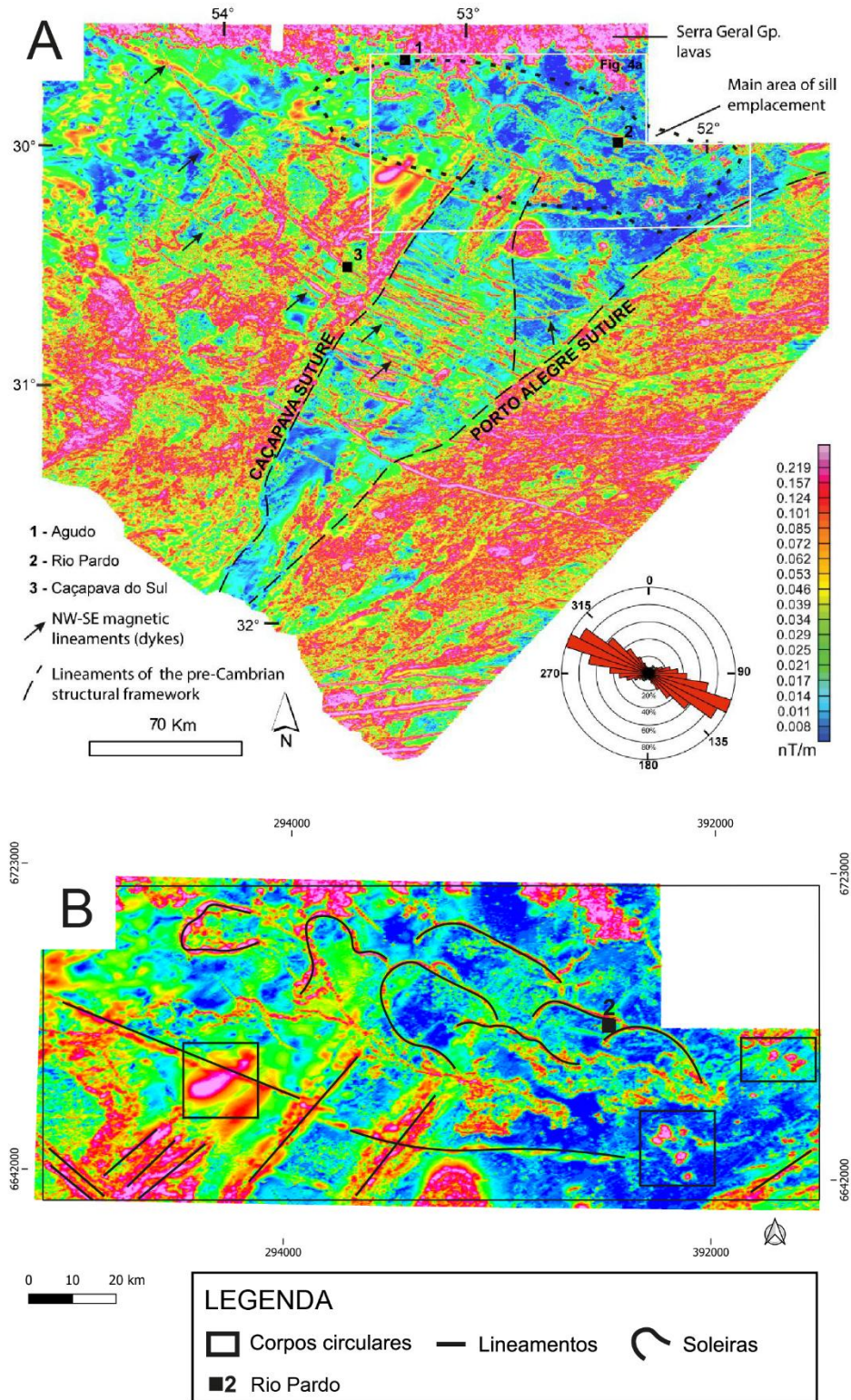
Figura 5 – Desenhos esquemáticos ilustrando morfologias de soleiras. (Adaptado: Galland et al. 2018).



4.3 Expressão Geofísica dos Complexos de Soleiras

O Projeto Aerogeofísico Escudo Sul-Rio Grandense (CPRM, 2010) permitiu estudos de diversos domínios intrusivos na PMPE, desvendando condicionantes desses eventos correlacionados aos dados de anomalia aeromagnética. Interpretações recentes, identificaram enxames de diques de direção NW-SE intrudindo o embasamento pré-cambriano do Rio Grande do Sul (Fig. 6a) (Salomon et al., 2017; Pessano et al., 2021) e complexos de soleiras com eixos de direção NW-SE intrudindo o embasamento e as unidades Permianas e Triássicas da Bacia do Paraná (Fig. 6b) (Simões et al., 2022).

Figura 6 – Mapa aeromagnetométrico do extremo sul do Brasil (CPRM, 2010). A) Mapa do sinal analítico de magnetometria da região sul do estado sul rio grandense. B) Mapa do sinal analítico da magnetometria da DCRS com principais feições relacionadas a soleiras (cf. Simões et al., 2022). Modificado pelo autor.



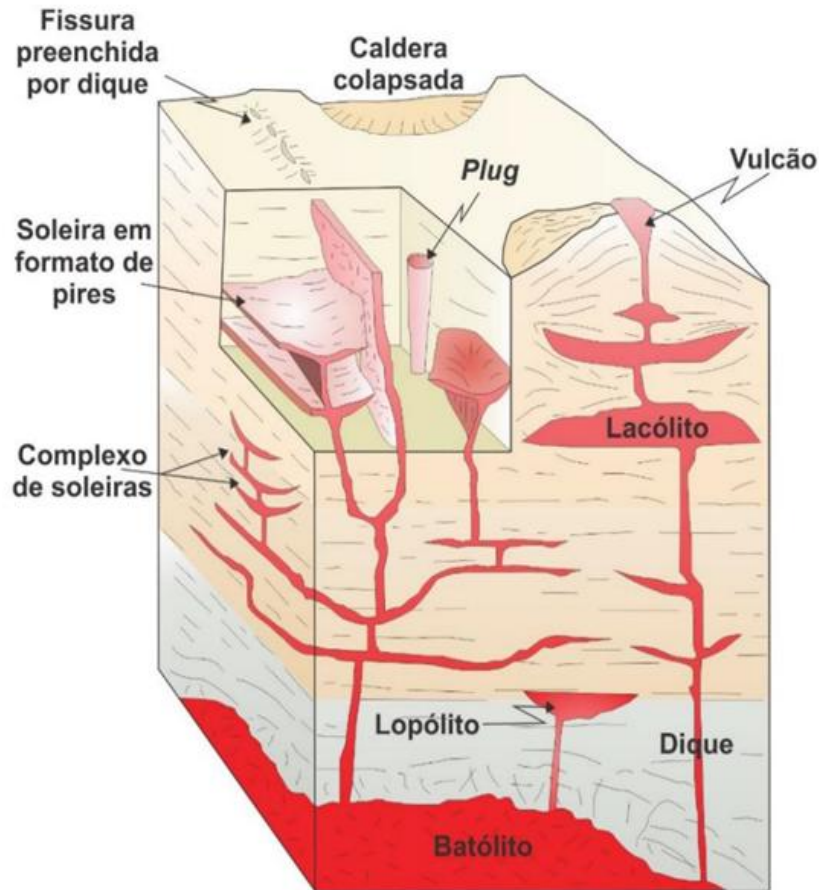
O complexo de soleiras de DCRS intrude uma área de 8.600 km² e possui uma área total de de 4.200 km². As feições lobulares são observadas na expressão geofísica com migração dos derrames na direção NW-SE, com dimensões de 10 a 20 km, variando em áreas de 8 km² a 800 km². As espessuras individuais variam de 1 a 15 m (escala subsísmica), espessura cumulativa mínima de 150 m, volumes individuais de 0,7 a 7 km³, com volume cumulativo mínimo de 35 km³ (Simões et al., 2022).

4.4 Magmatismo Intrusivo no Sul do Brasil

As intrusões associadas ao vulcanismo do Grupo Serra Geral constituem fenômenos comuns na Bacia do Paraná. A maioria das soleiras encaixa-se nas rochas sedimentares Paleozoicas da bacia, sendo frequentes ao longo de sua extensão, embora as porções aflorantes concentrem-se na região do limite leste (Zalán et al., 1985).

Jerram; Bryan (2015) caracterizam um sistema de alimentação magmática subvulcânicos, em múltiplas zonas de armazenamento de magma, dispostas e conectadas em arranjo intrusivo complexo desde níveis profundos a rasos na crosta, alimentando uma ampla variedade de tipos de intrusão: estruturas complexas em centros vulcânicos, complexos de soleiras, câmaras magmáticas com diferentes formas, lacólitos, lopólitos e enxames de diques (Fig. 6).

Figura 7 - Representação dos diferentes tipos de morfologias de intrusões em sistemas subvulcânicos. Retirado: Araújo (2023), modificado de Jerram e Bryan (2015).



Essas estruturas intrusivas complexas também ocorrem na porção sul da PMPE brasileira, paralelas às estruturas regionais do embasamento do ESRG, gerando enxames de diques. Os mais expressivos em extensão e conhecimento na porção sul do Brasil são Ponta Grossa (NW-SE), Florianópolis (NE-SW) e Sul do Brasil (NW-SE) (Araújo, 2023).

As soleiras distribuem-se regionalmente, abrangendo tanto a porção norte quanto sul da PMPE, com concentração na porção central da Bacia do Paraná onde a sequência sedimentar e vulcânica é mais espessa (Bellini et al., 1984). Nessa porção, a espessura cumulativa das soleiras pode alcançar aproximadamente 1.100 metros, segundo dados de poços da ANP na bacia. As soleiras possuem espessuras variando de 1 a 320 metros, com valor médio de 34 metros, evidenciando variabilidade nas dimensões dessas intrusões (Araújo, 2023).

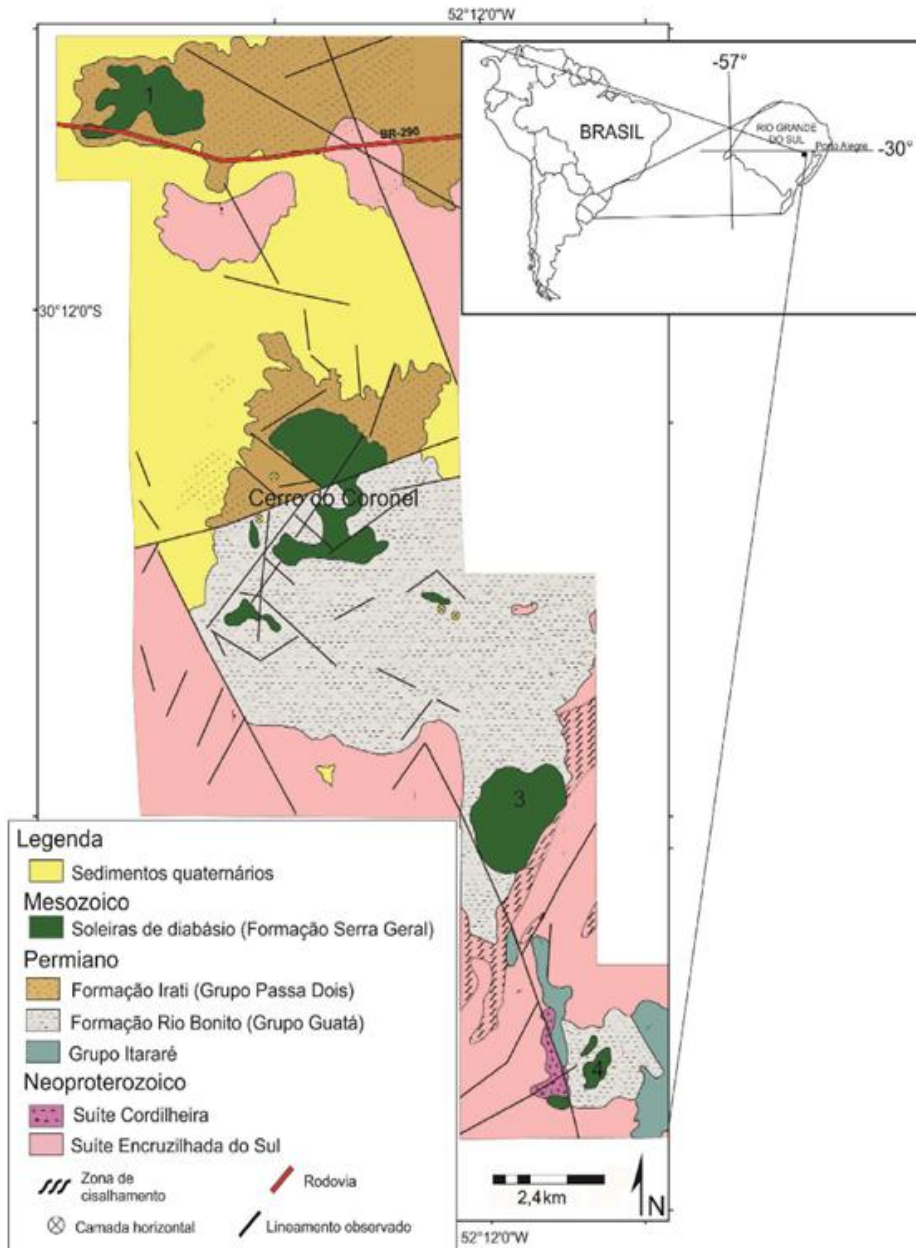
4.5 Cerro do Coronel e Complexo Morungava

Localizada no município de Gravataí/RS, os estudos na região de Morungava de Pinto et al. (2019) e os modelos geológicos e geofísicos 3D gerados (Araújo, 2023) na região de Morungava, servem como referência análoga para o presente trabalho.

No complexo Morungava, Picada et al. (1970) identificaram uma intrusão aflorante de olivina-gabro na área da pedreira de Lomba Grande. Posteriormente, Viero et al. (1991) realizou a caracterização dessa intrusão (petrografia, litoquímica, gravimetria e susceptibilidade magnética) e a classificou como um complexo básico intrusivo. São corpos múltiplos que variam em espessura de poucos metros a cerca de 440 m (Viero et al., 1992; Pinto et al., 2019). Em termos geoquímicos o corpo principal é classificado como picrobasalto e basalto (diagrama TAS) e possui padrões de ETR's similares aos basaltos P-MORB. Os outros corpos intrusivos do complexo apresentam composições químicas similares às rochas vulcânicas básicas do Grupo Serra Geral, classificadas entre basaltos e andesitos basálticos, e correspondem a duas intrusões doleríticas de 30 metros de espessura, que cortam o corpo principal, e uma intrusão a leste (Viero et al., 1991;1992). A oeste das intrusões de Morungava, ocorre o conjunto de soleiras do Cerro do Coronel (Sarmiento et al., 2014).

O Cerro do Coronel se localiza a oeste de Morungava, no limite sul da BP com a ESRG está situado diretamente na área sudoeste do polígono de estudo, no município de Pantano Grande. De acordo com Sarmiento et al. (2014), seu corpo ígneo se destaca no relevo com aproximadamente 12 km² de extensão e alinhamento preferencial NW-SE, seu contato basal é com rochas sedimentares das formações Irati e Rio Bonito que fazem contato pelo falhamento N70E, além da ocorrência de disjunções colunares. Na região do Cerro do Coronel, quatro soleiras principais são identificadas (Sarmiento et al., 2014). A primeira, situada a noroeste, próxima à BR-290, tem cerca de 20 metros de espessura e está em contato com as rochas da Formação Irati. A segunda soleira a sudeste, está acima de um falhamento SW-NE dividida em porção noroeste com 180 m de espessura e a porção sudeste com 30 metros, intrudindo a Formação Irati. A terceira e quarta soleiras intrudem a Formação Rio Bonito, ambas com aproximadamente 30 m de espessura.

Figura 8 - Mapa geológico estrutural e distribuição de soleiras no Cerro do Coronel. Retirado de Sarmento et al., (2014).



As soleiras Cerro do Coronel, estão inseridas em granitóides associados a Suíte Intrusiva Cordilheira e à Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul conferindo as unidades do embasamento cristalino ESRG. Atuando como encaixantes, as rochas sedimentares foram organizadas estratigraficamente nas formações Rio Bonito e Irati da Bacia do Paraná. Sarmento et al. (2014) informa que as intrusões básicas/intermediárias, contém em sua geoquímica, elementos que caracterizam uma

origem hipabissal desses corpos, podendo ser classificados como andesitos basálticos com afinidade toleítica.

Em escala macroscópica, as soleiras do Cerro do Coronel podem ser classificadas como dolerito, apresentando variações mínimas em termos faciológicas, texturais e composicionais. Nas regiões superior e inferior, a textura é predominantemente equigranular, variando de fina a afanítica. Já nas partes centrais, a textura é mais equigranular, com grãos de tamanho médio. Essas diferenças indicam um resfriamento mais rápido nas extremidades do corpo. A variação faciológica é sutil, sendo dominada por rochas equigranulares de granulação fina a muito fina, e, em raras ocasiões, por rochas porfiríticas. Em termos texturais, essas rochas exibem predominantemente a textura intergranular, com algumas áreas apresentando textura subofítica. São compostas principalmente por plagioclásio, augita, minerais opacos e, ocasionalmente, olivina. Minerais acessórios (apatita e quartzo) e mesóstase félsica se forma na fase final da cristalização. Na base da porção norte da soleira, ocorrem bolsões gabróicos centimétricos, com textura fanerítica grossa e composição similar à do restante da rocha. A evolução dessas rochas ocorreu por meio de cristalização fracionada, com destaque para o fracionamento de plagioclásio e augita durante o processo (Sarmiento et al., 2014).

Nas soleiras a sudeste do Cerro do Coronel, observam-se disjunções colunares poligonais com espaçamento centimétrico e uniforme, com preenchimento por carbonato, além de brechas hidráulicas compostas por fragmentos doleríticos e matriz carbonática. Já na soleira a noroeste do Cerro do Coronel, próxima à BR-290, as disjunções colunares se diferenciam das demais por serem mais espaçadas, com uma espessura aproximada de 1 metro (Sarmiento et al., 2014).

4.6 Princípios e Aplicações da Modelagem Tridimensional

A modelagem geológica 3D tem ganhado relevância crescente nas geociências, com o intuito de facilitar a compreensão geológica da superfície e subsuperfície como abordado por vários autores (Cowan et al., 2002; Stewart et al., 2014; Case, 2016; Araújo et al., 2023).

A partir da aplicação e avaliação da capacidade dos reservatórios nos modelos geológicos tridimensionais, representados em superfícies ou blocos, é possível definir domínios espaciais, geometrias ou volumes, na compreensão das interações entre

planos geológicos. A análise exploratória prévia de dados químicos e de sondagens, juntamente com o modelo geológico 3D *a priori*, pode permitir a construção do arcabouço estratigráfico e a caracterização das soleiras interceptadas por sondagens. (Araújo et al., 2023).

A modelagem implícita emprega algoritmos de interpolação para gerar superfícies e volumes diretamente a partir dos dados inseridos, resultando em um processo mais ágil, semiautomático e que facilita revisões e aprimoramentos conforme novas informações são incorporadas. Um exemplo dessa abordagem é o software *Leapfrog Geo*®, que aplica o interpolador *Fast Radial Base Function* (*FastRBF*™). As funções de base radial constituem uma classe de interpoladores globais, ou seja, sua estimativa considera todo o conjunto de dados de entrada (Cowan et al., 2002; Araújo et al., 2023).

4.7 Aplicações de modelagem 3D em complexos de soleiras

A modelagem 3D de soleiras para avaliação de potencial de armazenamento de CO₂ representa a inovadora aplicação dessa tecnologia, como observado nos projetos pilotos CarbFix e Wallula (Gíslason et al., 2018; McGrail et al., 2011) com aplicação na injeção de CO₂ em rochas basálticas. A modelagem 3D realiza caracterização tridimensional da geometria, sua morfologia e conectividade nas etapas iniciais de pesquisa, permitindo a identificação de volumes e zonas potenciais para injeção de CO₂ nas soleiras, avaliando sua capacidade de armazenamento.

Para De Oliveira et al., (2022) a modelagem geológica 3D amplia a análise de dados tradicionais ao permitir a visualização de geometrias, padrões espaciais e diferentes parâmetros estruturais e geoquímicos. Em estudos de armazenamento de CO₂, essa abordagem é aplicada de forma semelhante à utilizada em reservatórios de petróleo e gás, auxiliando na definição de pares eficientes de reservatório e selo e na compreensão da variabilidade e da continuidade das fácies. Abordagem promissora para os complexos de soleiras observadas no sinal analítico de magnetometria na DCRS, onde a forma, distribuição e conectividade desses corpos em subsuperfície são desconhecidas.

A análise exploratória dos dados químicos e das informações obtidas nos poços, aliada ao desenvolvimento do modelo geológico tridimensional no *Leapfrog Geo*®, possibilitou a elaboração de um arcabouço estratigráfico detalhado em

Morungava/RS. Para Araújo (2023), o conjunto integrado de dados, permite identificar e caracterizar as soleiras interceptadas pelos poços, descrevendo sua distribuição espacial e classificando suas composições petrográficas e geoquímicas. Tal exemplo corrobora a aplicabilidade dos dados de furos de sondagem com dados qualitativos, para o processamento do modelo 3D objetivando a geometria das soleiras, contribuindo para análises análogas de regionalidade, metodologia e resultado.

5. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseou-se na revisão bibliográfica pautada pelos estudos de Cowan et al., 2003; Stewart et al., 2014; Case, 2016; Araújo, 2023, amparados pelo *User Manual for Leapfrog Geo*® versão 5.0 (Seequent - Bentley, 2019), integrando múltiplas fontes de dados para a construção representativa do modelo geológico tridimensional da área de estudo. As etapas incluíram: (1) revisão bibliográfica sistemática e identificação de trabalhos análogos nas técnicas aplicadas; (2) compilação e processamento de dados públicos de sistemas de informação geográfica (SIG) no software QGIS®; (3) análise qualitativa e interpretação de 1.917 furos de sondagem (CPRM, 1980); e (4) análise de dados de expressão geofísica aeromagnéticos do Projeto Aerogeofísico Escudo Sul-Rio-Grandense (CPRM, 2010).

5.1 Fonte de dados

Dados de relevo: modelo digital de elevação - GeoTIFF do COPERNICUS, com resolução de 30 m, acessadas pelo *plugin Open Topography DEM* no software QGIS® com base na *World Geodetic System* (1984).

Dados SIG: mapa vetorial geológico da Bacia do Paraná - 1:750.000 (Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM, 2008).

Aeromagnetometria: baseada no levantamento do Projeto Aerogeofísico Escudo Sul Rio-grandense (CPRM, 2010) realizado pela LASA Engenharia e Prospecções e disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). O banco de dados “.xyz” e o relatório associado, de acesso público.

Sondagem: descrição de testemunhos de sondagem e estratigrafia conhecida em bibliografia, incluindo mapas geológicos na escala 1:100.000, além de dados de

1.917 furos de sondagem realizados pelo Projeto Carvão do Rio Grande do Sul (CPRM, 1980).

5.2 Análise e organização banco de dados.

Os dados SIG foram integrados no software QGIS®, e processados com a finalidade de geração de produtos georreferenciados para a modelagem. O processamento dos furos de sondagem e a modelagem geológica 3D foram realizados no software *Leapfrog Geo*® (Seequent - Bentley, versão 2025.02), que utiliza algoritmos de interpolação implícita (*FastRBF*™) para gerar superfícies tridimensionais a partir de dados geológicos qualitativos e semi-quantitativos. Os perfis litológicos da sondagem foram compilados em planilhas estruturadas, contendo informações de topo, intervalo e base, caracterizando a profundidade, espessura, litologia e contatos geológicos de cada unidade interceptada, associadas a revisão bibliográfica.

Tabela 2 – Arquitetura e organização prévia dos furos de sondagem

TABELA	COLUNAS	OBSERVAÇÃO
Collar	Nome	Nome do furo de sondagem
	CoordX	Coordenada X (UTM)
	CoordY	Coordenada Y (UTM)
	CoordZ	Cota boca do furo
	Profundidade	Profundidade do final do furo de sondagem
Litologia	Nome	Nome do furo de sondagem
	De	Profundidade inicial do intervalo litológico
	Até	Profundidade final do intervalo litológico
	Litotipo	Litotipo contido no intervalo
Estratigrafia	Nome	Nome do furo de sondagem
	De	Profundidade inicial do intervalo estratigráfico
	Até	Profundidade final do intervalo estratigráfico
	Unidade	Unidade estratigráfica do intervalo

Esta sistematização permitiu identificar a localização precisa e correlação espacial das soleiras em subsuperfície, bem como a definição dos limites das formações sedimentares encaixantes da Bacia do Paraná.

5.2.1 Fluxo de trabalho *Leapfrog Geo*®

O fluxo de trabalho (Apêndice A) seguiu as seguintes etapas estruturais para modelagem: (1) importação e validação dos dados de entrada; (2) criação de superfícies topográficas e do embasamento com dados de relevo; (3) modelagem dos corpos intrusivos com base nos furos de sondagem; (4) interpolação do arcabouço estratigráfico; e (5) cálculo de volumes, espessuras e análise de interconectividade das soleiras.

5.3 Processamento de dados

5.3.1 Análise e filtragem furos de sondagem

Esta etapa constituiu na compilação de dados litológicos e estruturais CPRM em escala 1:100.000 em plataforma SIG no software QGIS®, com padronizações cartográficas SRC (EPSG: 32722 - WGS 84 / UTM zone 22S). Previamente à modelagem, o banco de dados de sondagem foi submetido a controle de qualidade, envolvendo a validação das tabelas *collar* (localização), *survey* (trajetória) e *geology* (litologia). As seguintes correções foram aplicadas: (1) ajuste das cotas topográficas do topo dos furos e padronização do formato de coordenadas geográficas; (2) identificação e remoção de dados *outliers*; e (3) exclusão de furos sem descrição litológica ou localizados fora da poligonal de estudo com expressão geofísica na DCRS. Este processo reduziu o conjunto de dados de 1.917 para 1.019 furos de sondagem, assegurando consistência espacial e confiabilidade das informações de entrada para a modelagem 3D.

5.3.2 Importação e análise qualitativa dos furos de sondagem

A importação de dados seguiu o fluxo de trabalho do *Leapfrog Geo*®, iniciando-se pela definição do sistema de referência espacial e pela delimitação do bloco de modelagem tridimensional associada ao modelo digital de elevação. Inicialmente, foram carregados os dados cartográficos e topográficos. Em seguida, foram importadas imagens georreferenciadas de mapas geológicos e composições de satélite, previamente processadas e exportadas no *software* QGIS®, para auxiliar na delimitação espacial da área de estudo e na definição de parâmetros de resolução do

modelo 3D (Seequent, 2019). Estas camadas forneceram o contexto geológico de superfície para validação das interpretações em subsuperfície, e validação da distribuição dos furos que interceptam os corpos intrusivos na DCRS. Os dados de sondagem, organizados nas tabelas *collar* (1.019 furos), *survey* (trajetórias) e *geology* (intervalos litológicos), foram então importados e vinculados ao sistema de referência do projeto. Cada intervalo litológico foi classificado conforme as unidades estratigráficas identificadas, com base nas descrições litoestratigráficas originais dos testemunhos (CPRM, 1980).

5.3.3 Modelagem geológica

A interpolação por *FastRBF*[™] exige que alguns parâmetros sejam definidos previamente: o *model drift* (que pode ser linear ou constante), o tipo de função RBF empregada (linear ou esferoidal) e a configuração do trend (isotrópico ou anisotrópico) amplamente abordado por Stewart et al. (2014) com maior profundidade técnica. Na prática, ao lidar com depósitos minerais e reservatórios, a função RBF esferoidal tende a representar melhor a realidade geológica do que a linear. Isso acontece porque os corpos intrusivos geralmente apresentam geometrias mais complexas e transições graduais, características que a função esferoidal captura com mais fidelidade. Por essa razão, optou-se por utilizar o modelo esferoidal em todas as interpolações realizadas neste trabalho, desde o modelo inicial até as demais etapas.

5.3.4 Interpolador *FastRBF*[™]

O algoritmo *FastRBF*[™] aplica funções de interpolação para inferir valores a partir dos dados originalmente amostrados. Esses valores interpolados servem de base para a construção das superfícies geológicas, que são então integradas ao processo de elaboração do modelo tridimensional (*Geo User Manual Seequent-Bentley*, 2019). O *Leapfrog Geo*[®] é um exemplo de software de modelagem geológica implícita, que utiliza o interpolador *Fast Radial Base Function* (*FastRBF*[™]). As funções de base radial são uma família de funções de interpolação globais, ou seja, o interpolador depende de todos os dados de entrada (Cowan et al., 2002), podendo assumir os parâmetros multidomínio, indicador e de distância (*Geo User Manual Seequent Bentley*, 2019).

Em modelos de armazenamento de CO₂, a aplicação dessa técnica tem como análogo a avaliação de reservatórios de petróleo e gás. Esses modelos são fundamentais para definição dos pares reservatório-selo, a fim de garantir o aprisionamento eficaz do CO₂ (De Oliveira et al., 2022).

5.4 Refinamento e Modelagem geológica

Considerando a extensa área de estudo previamente incorporado ao projeto (~8.600 km²) em contraste com as espessuras relativamente reduzidas nas porções mais rasas da bacia considerando a extensão dos furos descritos, implicou em testes de diferentes parâmetros do *Leapfrog Geo*® e redução de escala de trabalho, para garantir a otimização da resolução dos corpos alvos deste trabalho. As superfícies geradas automaticamente pelo *software*, ajustadas através do controle dos parâmetros que o software oferece, foram editadas com base no conhecimento geológico prévio. A criação de intervalos estratigráficos a partir de dados qualitativos permitiu o refinamento das superfícies, evitando que o algoritmo interpole dados incompatíveis entre si.

Após a projeção georreferenciada dos furos de sondagem e aplicação de filtros às informações descritivas, as primeiras tentativas de modelagem dos corpos intrusivos resultaram em superfícies geometricamente distorcidas e incompatíveis com o mapeamento dos intervalos vulcânicos contida nos furos, em um comportamento inconsistente em relação à morfologia esperada para intrusões tabulares. Este problema motivou o estabelecimento de novos critérios de filtragem espacial para redução da área modelada, baseados em: (1) correspondência espacial entre furos e zonas de soleiras identificadas como anomalias magnéticas lineares curvas na aeromagnetometria; (2) adensamento da malha amostral para melhor eficiência da interpolação numérica e resolução dos corpos de interesse; (3) estimativa do espaçamento médio entre os furos.

Figura 9 – Gráfico de espaçamento médio entre os furos de sondagem, para caráter de filtragem.



A aplicação destes critérios delimitou uma área potencial localizada a sudeste do município de Rio Pardo, abrangendo 286 km² com 208 furos de sondagem. Para maximizar a qualidade da modelagem 3D, procedeu-se a uma segunda etapa de refinamento focada na remoção de *outliers* na malha a partir do espaçamento médio entre furos (Fig. 9), selecionando 96 furos (Apêndice B) para execução da modelagem.

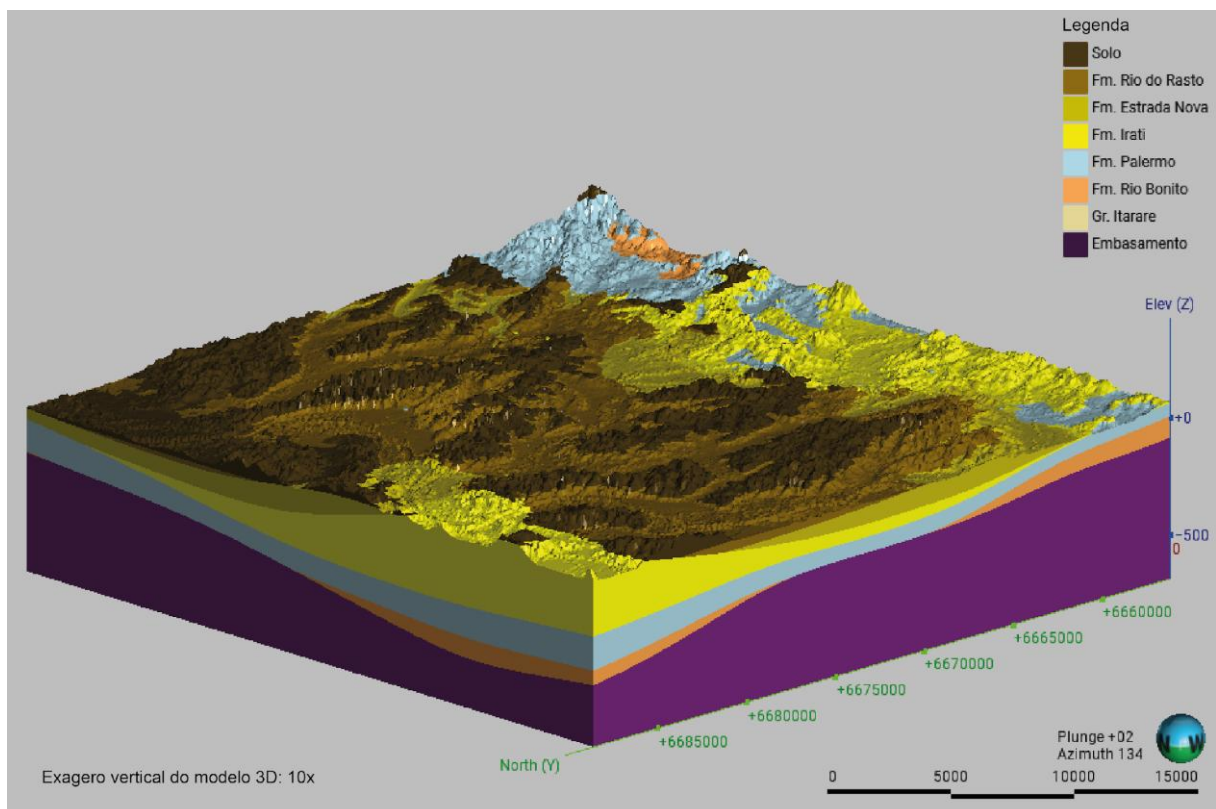
A partir da morfologia inicial gerada pela modelagem, procedeu-se ao refinamento sistemático dos parâmetros de interpolação através de testes comparativos com os dados litológicos de sondagem e a assinatura aeromagnética das intrusões. Os parâmetros finais de resolução foram ajustados em 2 domínios (soleira e estratigráfico) para otimizar a representação da interconectividade entre as soleiras, e suavizar as curvas considerando-se as direções preferenciais (*trends*) dos elipsóides de busca utilizados no cálculo numérico de interpolação espacial.

O tratamento e a revisão dos dados possibilitaram interpolar espacialmente as unidades geológicas, resultando em superfícies estratigráficas contínuas dentro dos limites estabelecidos (*boundary*). O modelo 3D com todas as informações geológicas disponíveis serviu como base para a etapa subsequente de interpretação qualitativa e semi-quantitativa dos furos de sondagem, além da comparação com os dados aeromagnéticos.

6. RESULTADOS

A modelagem 3D foi obtida a partir dos 96 furos de sondagem filtrados, distribuídos de maneira heterogênea pela área de estudo com espaçamento médio entre os furos de 5,8 km e profundidades variando entre 7,8 m e 638,9 m. Dentre estes, 38 furos de sondagem interceptam intrusões doleríticas e 55 furos o embasamento cristalino, permitindo uma visualização da distribuição espacial do arcabouço litoestratigráfico em subsuperfície, que gradativamente aumenta a profundidade na direção NW rumo a DCRS (Fig. 10). As soleiras ocorrem em profundidades de 41 m a 464.7 m, sugerindo múltiplos níveis intrusivos com interconectividade horizontal e vertical.

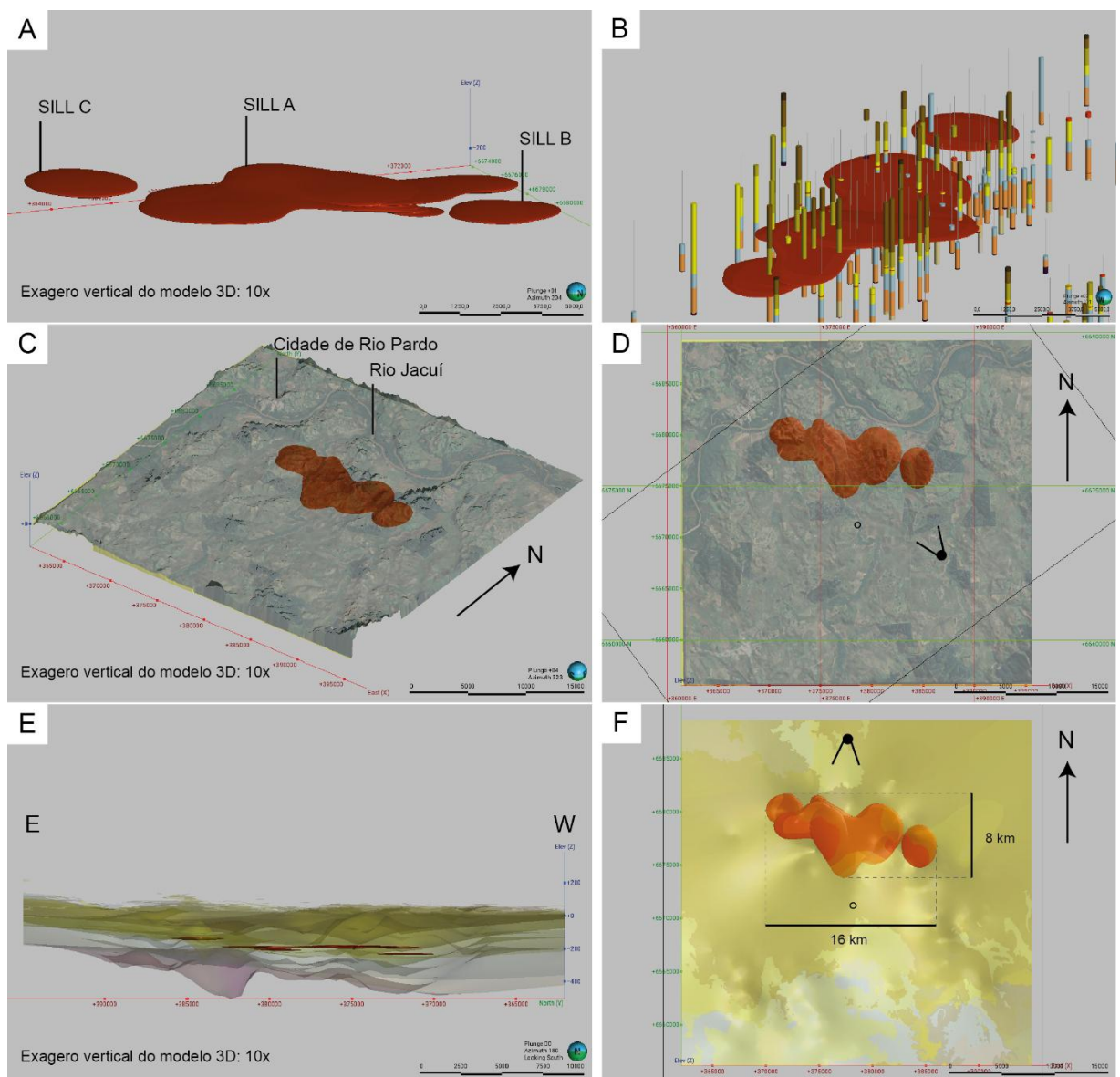
Figura 10 – Bloco de modelagem geológica 3D, da área de estudo em perspectiva isométrica.



6.1 Domínio soleiras

O domínio modelado conta com 38 sondagens que interceptam um ou mais corpos intrusivos ou soleiras, totalizando 45 intervalos vulcânicos. A superfície modelada é resultado da interpolação entre 19 furos a uma profundidade de 210 m, com variações de espessura entre 0,4 m e 18 m revelando a presença de um sistema complexo de soleiras em subsuperfície (Fig. 11). Os intervalos vulcânicos foram modelados, com 3 corpos resultantes apresentando melhor continuidade lateral ainda que separados em uma arquitetura qualitativa dos dados, correspondendo a dimensões de 16 km leste-oeste, por 8 km norte-sul, nomeados como Sill A, Sill B e Sill C (Fig. 11a; 11b) para finalidade descritiva. Os doleritos intrudem majoritariamente na Fm. Irati, e em porções das Formações Palermo e Estrada Nova. Os corpos aderem no modelo uma geometria irregular, de morfologia lobular plano-paralela alongada na direção leste-oeste (Fig. 11c;11d), além de formas elipsoidais regulares nos corpos de menor dimensão, aderindo os parâmetros discutidos na metodologia.

Figura 11 – Mosaico da soleira 3D. A) Três corpos (Sill A, Sill B e Sill C) de soleiras desconectados em arranjo complexo. B) Furos de sondagem que interceptam os intervalos vulcânicos com soleiras modeladas. C) Modelo de superfície 3D em perspectiva isométrica, com localização das soleiras em relação ao Rio Jacuí e a cidade de Rio Pardo. D) Mapa de localização de soleira em mapa. E) Perfil leste-oeste da soleira interceptando as superfícies projetadas das formações da Bacia do Paraná. F) Mapa da soleira interceptando as superfícies projetadas das formações da Bacia do Paraná, com dimensões gerais.



A Sill A apresenta dimensões de 12,6 km na direção leste-oeste e 8,1 km na direção norte-sul, distribuído em uma área de 82.344 m², com volume estimado de 467.458,538 m³, espessura média de 7,29 m e máxima cumulativa de 24 m em zonas de interconectividade. A Sill B tem dimensões menores de 3,5 km na direção leste-oeste e na direção 3,2 km norte-sul, em uma área total de 17.250.000 m² e volume de 75.009 m³, com espessura média de 7,7 m e máxima de 10,7 m. Por sua vez a Sill C tem dimensões de 3,2 km na direção leste-oeste e 4 km na direção norte-sul, distribuída em uma área de 20.844 m² com ocupação volumétrica de 122.510 m³, espessura média de 13,5 m e máxima de 18,8 m (Tab. 2). As feições em perfil apresentam concordância horizontal com o arcabouço estrutural das unidades sedimentares encaixantes (Fig. 6).

Tabela 3 – Dados geométricos semi-quantitativos geradas pelo *Leapfrog Geo*® com dimensões, área (m²), volume (m³), espessura média (m), espessura média cumulativa (m) referente a Sill A, Sill B e Sill C.

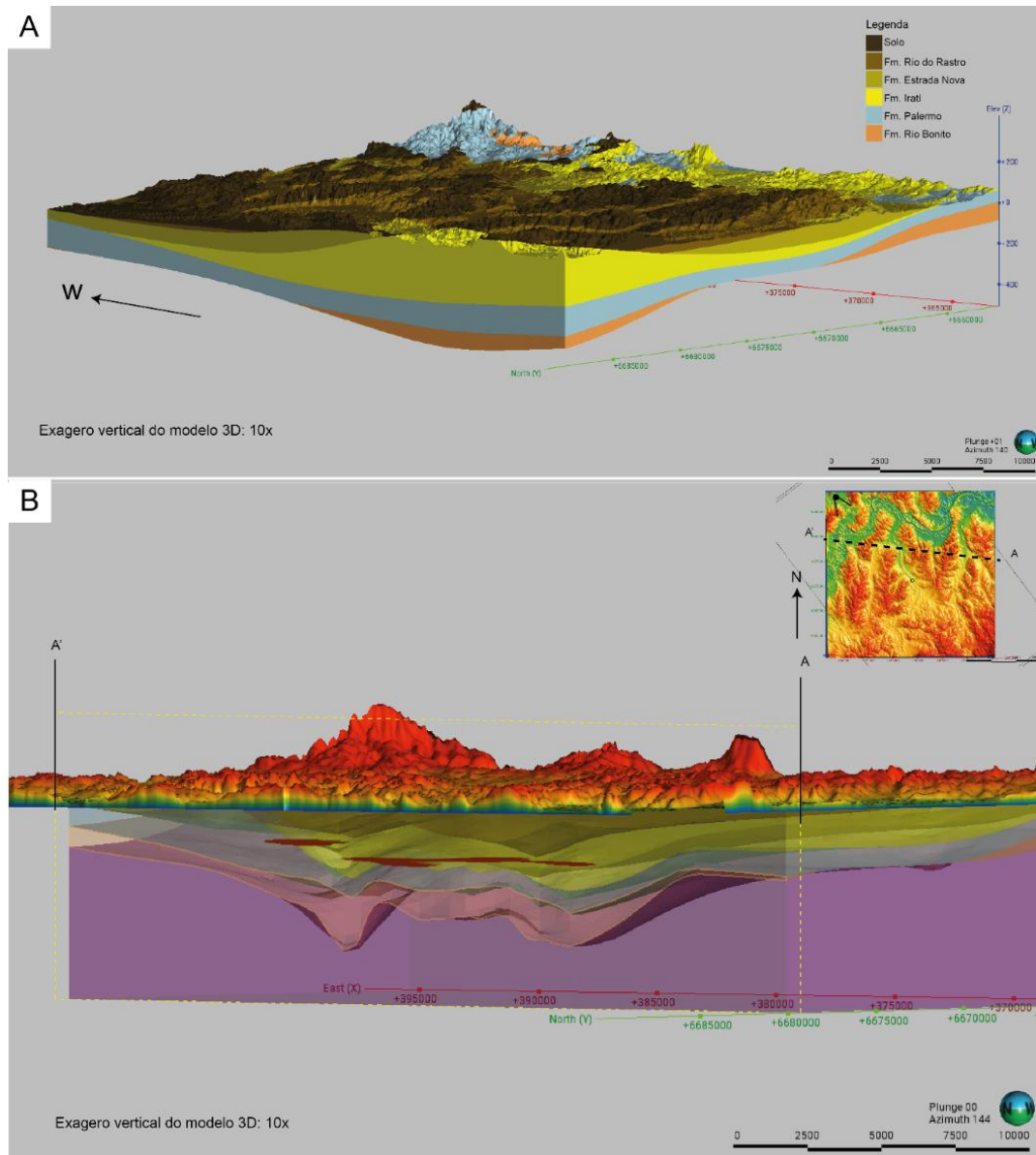
Dados Geometria Soleiras			
	Sill A	Sill B	Sill C
Dimensões (km) W-E	12,6	3,5	3,2
Dimensões (km) N-S	8,1	3,2	4,0
Área (m ²)	82.344	17.250	20.884
Volume (m ³)	467.458,538	75.009	122.510
Espessura média (m)	7,29	7,7	13,5
Espessura máxima cumulativa (m)	24	10	18,8

6.2 Domínio estratigráfico

A modelagem do arcabouço estratigráfico, contribuiu para definir a disposição e continuidades laterais das formações, conectando os furos de sondagem com limites de base e topo, as formações Rio do Rastro, Estrada Nova, Irati, Palermo, Rio Bonito e por sua vez o embasamento cristalino do ESRG. A porção sul apresenta as menores

espessuras da BP de até 8 m, aumentando gradativamente a espessura, à medida que o embasamento mergulha para N em direção a DCRS. A espessura máxima da BP é de 647 m na direção NW, coincidente com a localização do Rio Jacuí. A profundidade máxima da BP chega em 508 m, no contato com a profundidade máxima do embasamento, evidenciando calhas lineares com ligeira orientação NW-SE, que foram preenchidas pela deposição das formações Rio Bonito e Palermo, horizontalizando as estruturas superficiais à medida que as demais formações da BP se acomodaram (Fig. 12a).

Figura 12 – Arcabouço estratigráfico da área de estudo. A) Disposição lateral das formações sedimentares da BP. B) Perfil ilustrativo mostrando mapa hipsométrico do relevo, superfícies conectadas das formações sedimentares e a soleira modelada em perspectiva.



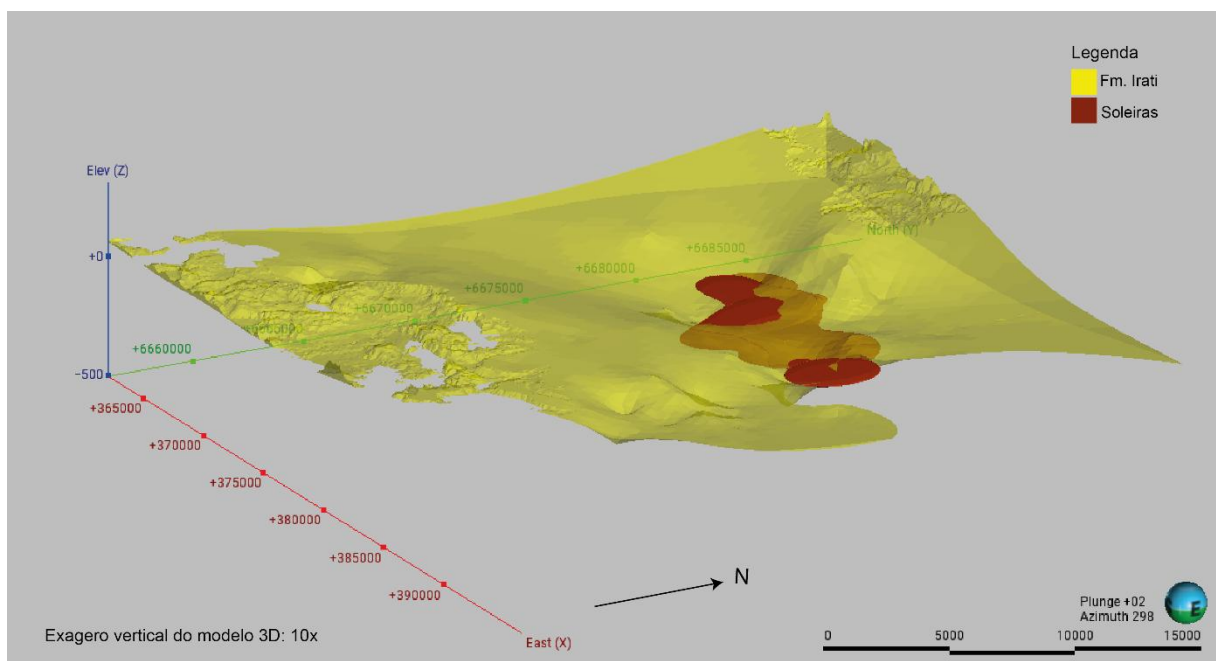
7. DISCUSSÃO

7.1 Soleiras: geometria, morfologia e controles

As ferramentas de modelagem, geológica tem se tornado cada vez mais útil na caracterização em sub-superfície de reservatórios CCUS. A literatura internacional reforça a relevância dessas ferramentas ao demonstrar que modelos 3D são ferramentas-chave para caracterizar volumes, conectividade e heterogeneidade de reservatórios em projetos de CCUS, como ilustram os casos CarbFix e Wallula (McGrail et al., 2011; Gíslason et al., 2018), além das diretrizes metodológicas apresentadas por De Oliveira et al. (2022). A utilização da modelagem tridimensional mostrou-se eficiente para delimitar o posicionamento das soleiras, esclarecer sua configuração interna e fornecer uma estimativa semi-quantitativa de sua geometria e qualitativa sobre a continuidade lateral.

A intrusão preferencial nos estratos da Fm. Irati (Fig.13), é condicionada pela granulação fina e laminação plano-paralela, típicas dessa unidade. Além disso a Fm. Irati constitui selos de dimensões regionais, o que reforça a importância de considerar estes litotipos como possíveis elementos de compartimentação ou rotas preferenciais de fluxo subterrâneo.

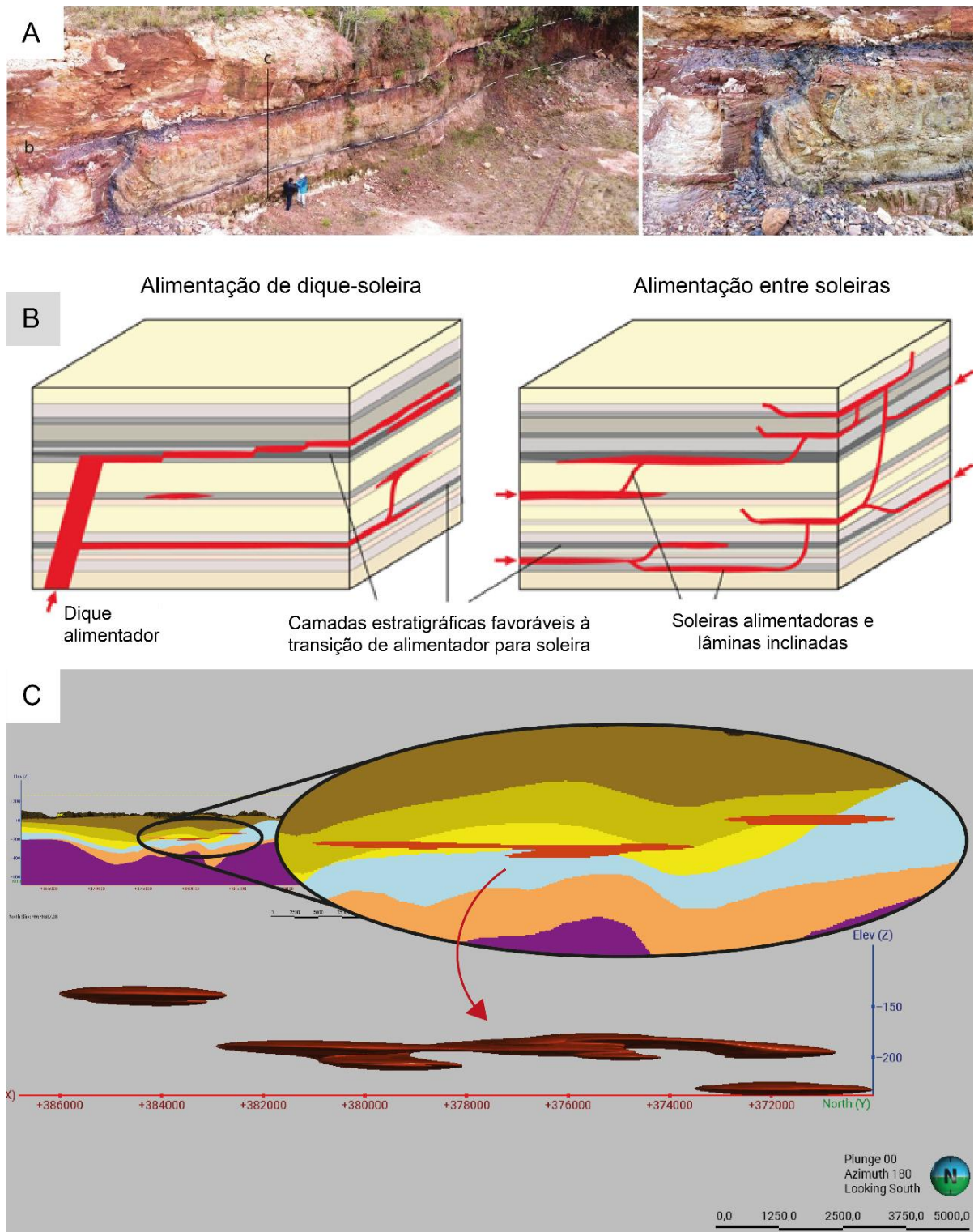
Figura 13 – Modelo 3D da distribuição das soleiras intrudindo a Fm. Irati.



A modelagem revelou um sistema intrusivo composto por múltiplos níveis, distribuídos entre 41 m e 465 m de profundidade e conectados lateralmente em diferentes degraus. As espessuras variam entre 0,4 m e 18 m, resultando em três corpos principais com dimensões descritas (tabela 3): Sill A (12,6 km W-E / 8,1 km N-S), Sill B (3,5 km W-E / 3,2 km N-S) e Sill C (3,2 Km W-E / 4,0 Km N-S), variando em área de 82,34 km² a 17,25 km² alojados majoritariamente na Fm. Irati e secundariamente nas formações Palermo e Rio Bonito. A geometria resultante da modelagem, coincide com os estudos de morfologia de soleiras em expressão geofísica, e comparação com dados de campo (Fig. 14a) conferidos na revisão bibliográfica. Simões et al., (2022), propõe que as morfologias circulares, indica feições 'lobulares' de 10 a 20 km, variando em áreas de 8 km² a 800 km². Em escala subsísmica, as espessuras individuais variam de 1 a 15 m.

Em alinhamento a essa perspectiva, Magee et al., (2016) demonstram que as soleiras atuam não apenas para o transporte lateral de magma, mas também para seu armazenamento em múltiplos níveis crustais, atuando como elementos-chave na arquitetura interna dos sistemas magmáticos (Fig. 14b). As geometrias tabulares, pouco espessas e descontínuas, são compatíveis com mecanismos de colocação controlados pela estratificação mecânica da bacia (Fig. 14c), como sugerido por Araújo (2023) e Galland et al. (2018).

Figura 14 – Análise comparativa de continuidade e morfologia das soleiras no modelo. A) Soleira em perfil, revelando fluxos magmáticos em escada, preenchendo camadas de granulação mais fina e com laminação horizontal (M.S. Simões, não publicado) B) Desenho esquemático de sistemas de alimentação: dique/soleira, soleira/soleiras através de condutos inclinados. Modificado de Airoidi et al., 2016. Retirado e modificado Galland (2018). C) Soleiras modeladas relevando morfologia 'híbrida' em corte.

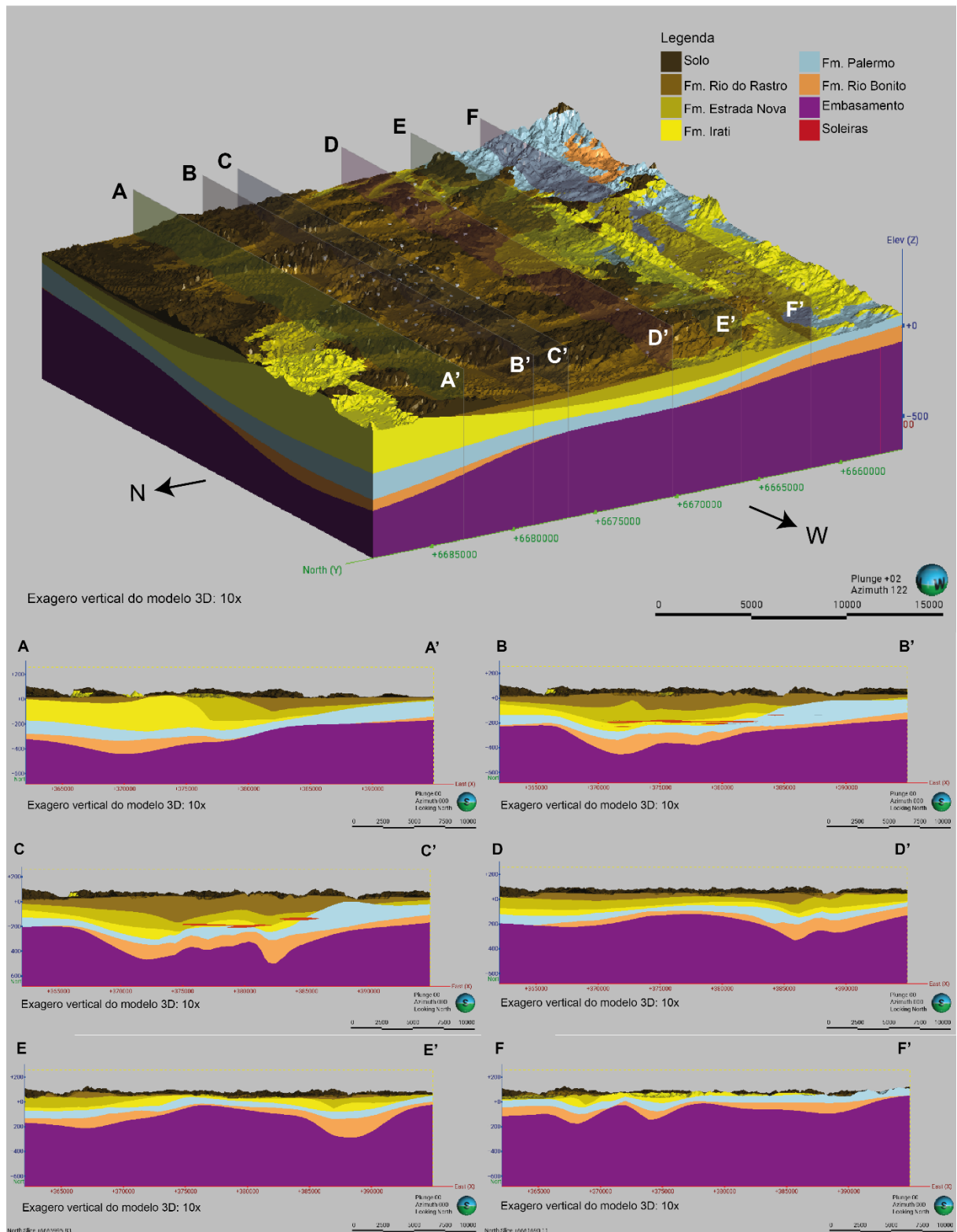


A presença de três corpos intrusivos desconectados indica que, embora haja evidências de interconectividade em escala local, o sistema intrusivo não se estende como um único reservatório regional, como ocorre em setores centrais da Bacia do Paraná, onde a espessura cumulativa pode ultrapassar 1.100 m (Renner, 2010; Araújo, 2023). Os resultados sugerem que o domínio modelado pode representar um segmento periférico desses sistemas intrusivos, marcado por corpos menores, mas ainda assim estruturados em uma rede complexa. As dimensões obtidas também refletem diretamente o espaçamento dos furos: uma malha mais densa permitiria definir melhor a continuidade lateral das soleiras e refinar a geometria dos corpos, como discutido por Cowan et al. (2003) em modelagens implícitas.

7.2 Arcabouço estratigráfico

O modelo tridimensional sintetiza a distribuição das formações sedimentares da Bacia do Paraná de forma mais integrada do que as interpretações individuais de sondagens. A interpolação implícita permitiu reconstruir superfícies contínuas a partir dos 96 furos selecionados (Fig. 15). O resultado confirma o aprofundamento progressivo das unidades em direção à DCRS e a coerência geométrica entre as formações Irati, Palermo e Rio Bonito, que funcionam como horizontes preferenciais para alojamento intrusivo, comportamento esperado para bacias sedimentares amplas, onde o empilhamento litoestratigráfico exerce forte controle na propagação de intrusões tabulares, como discutido por Magee et al. (2017).

Figura 15 – Modelo 3D com 6 seções leste-oeste (A,B,C,D,E,F), projetadas em perfis geológicos.



O modelo geológico demonstrou que a Fm. Irati atuou como uma das principais unidades que alojaram o sistema de soleiras analisado. Essa relação também é evidenciada pelo posicionamento basal das intrusões do Cerro do Coronel, que se

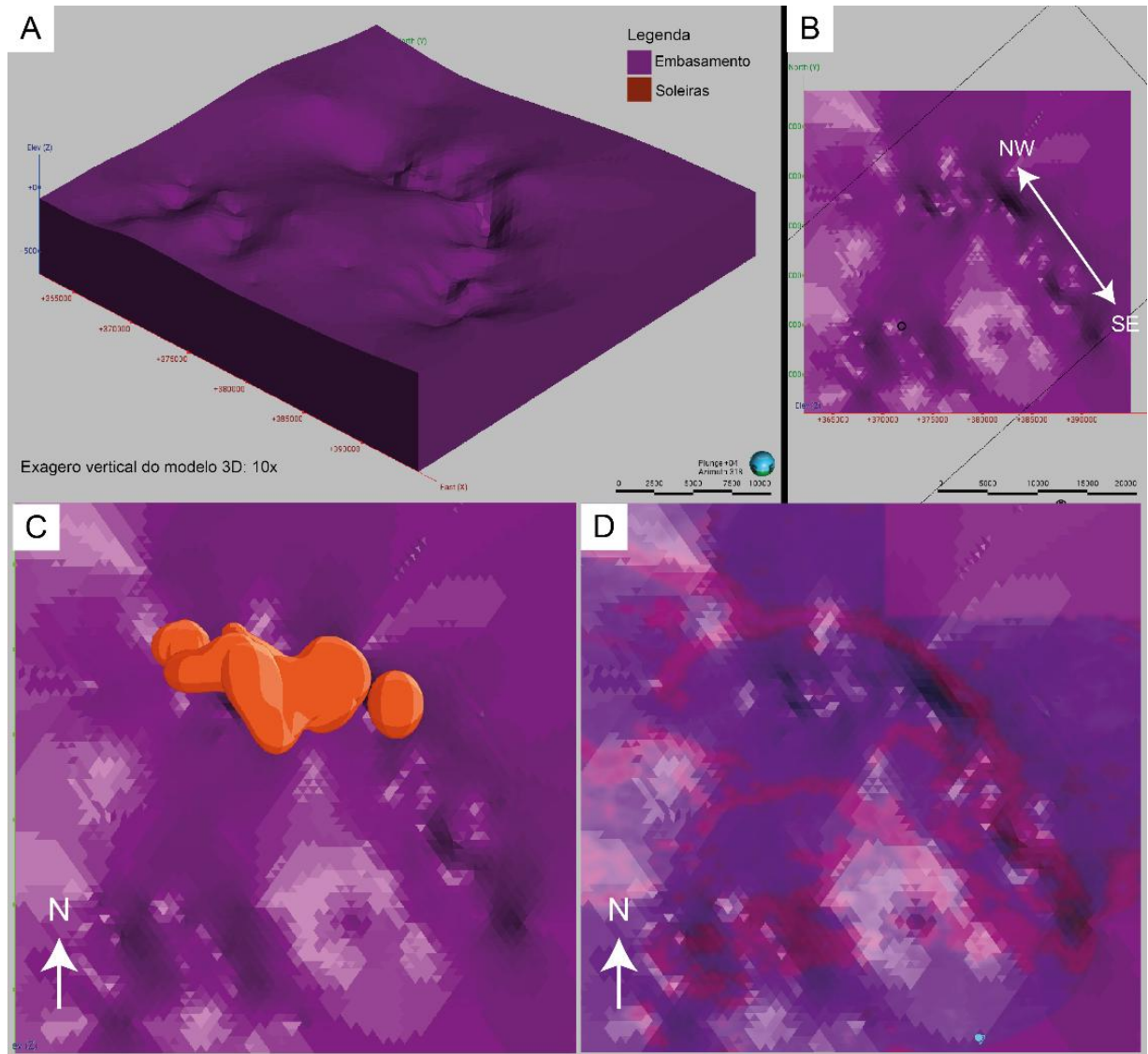
instalam diretamente sobre essa formação, conforme discutido por Sarmento (2014). Conforme descrito por Milani (2007), a Fm. Irati se depositou durante o Permiano Inferior, e manifesta expressiva diversidade faciológica ao longo da Bacia do Paraná. Na sua porção meridional, onde se insere a DCRS, predominam litotipos finos como pelitos, margas e folhelhos betuminosos, que caracterizam possíveis corredores de fluxo magmático intrusivo. As zonas faciológicas caracterizadas por elevada permeabilidade e porosidade na Formação Irati atuam como condutos preferenciais para o fluxo magmático intrusivo, condicionando a propagação lateral em subsuperfície. Estes corredores favorecem o desenvolvimento de redes de interconectividade, tanto contínuas quanto descontínuas, estabelecendo ramificações horizontais que se estendem através de múltiplos níveis estratigráficos da Bacia do Paraná, configurando um sistema de alimentação magmática compartimentado e controlado pela anisotropia mecânica das formações encaixantes.

Além disso, o contato térmico entre o magma cretáceo e os folhelhos ricos em matéria orgânica gera possíveis alterações locais no grau de maturação desses compostos, fenômeno apontado por Souza (2004) como crucial para compreender os processos que controlam a colocação das intrusões em determinados níveis estratigráficos, e sua relação de corte intrusivo na Fm. Irati.

7.3 Paleolineamentos no embasamento, associados a zonas alimentadoras de soleiras em bacias sedimentares.

O paleorrelevo modelado do embasamento cristalino correspondente ao Bloco Encruzilhada, revela uma superfície irregular com paleovales no sentido NW-SE (Fig. 16a;16b), sugerindo influência na deposição das formações basais, que preencheu o espaço de acomodação (Fig. 15). Complexos intrusivos também ocorrem na porção sul da PMPE, paralelas às estruturas regionais do embasamento do ESRG, gerando enxames de diques sendo os mais expressivos em extensão e conhecimento na porção sul o Ponta Grossa (NW-SE), Florianópolis (NE-SW) e Sul do Brasil (NW-SE) (Araújo, 2023). Esse arcabouço estrutural herdado, parece condicionar a formação de feições tectônicas intrabaciais em grande escala na área modelada, incluindo arcos e calhas, compartimentando a sedimentação ao longo de sua evolução.

Figura 16 – Superfície do embasamento cristalino em modelagem 3D. A) Modelo embasamento em perspectiva. B) Orientação das calhas NW-SE. C) Posição soleiras sobre o embasamento. D) Correlação da expressão geofísica, com as calhas estruturais.



Enxames de diques geralmente afloram nos arcos estruturais da Bacia do Paraná, intrudindo o embasamento Paleo a Neoproterozoico da Província Mantiqueira (Pessano et al., 2021). Segundo Sarmiento et al., (2014) e Simões et al. (2022), no limite entre o embasamento cristalino e a Bacia do Paraná ocorrem intrusões (Fig. 16c) associadas à intrusões como as do Cerro do Coronel, localizado aproximadamente a 14 km ao sul da área.

Zalán et al., (1987) identifica o sistema de lineamentos que afetam a bacia NW-SE (fraturas e falhas extensionais), associado não apenas ao controle de subsidência diferencial e a arquitetura deposicional, mas também influenciaram posteriormente a

colocação de intrusões magmáticas da PMPE durante o Cretáceo Inferior. O modelo 3D revela que a orientação dos paleovales associados a paleolineamentos NW-SE, são contornados pelas anomalias de alto valor magnético da expressão geofísica e coincidentes espacialmente com os 3 corpos intrusivos modelados. Este padrão NW-SE é consistente com a direção de migração dos derrames observada por Simões et al., (2022).

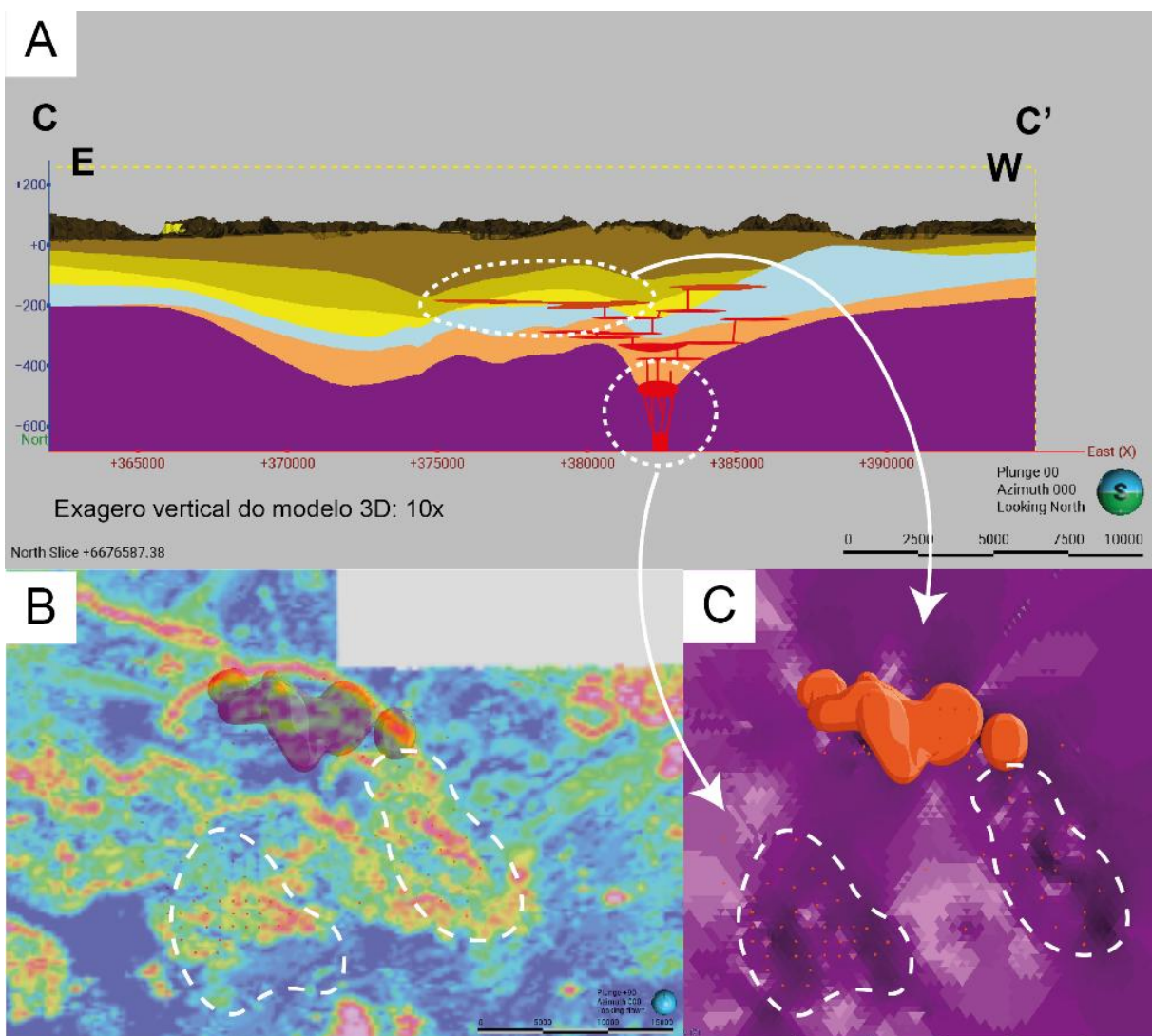
Para Jerram; Bryan (2015) as fissuras desempenham papel decisivo na movimentação e na ascensão de magmas, tanto máficos quanto silícicos. Em muitos casos, o magma permanece retido em zonas rasas da crosta, a menos de 1,5 km de profundidade, onde pode originar conjuntos de soleiras de diferentes dimensões e complexidades ou ainda alimentar centros intrusivos de forma mais arredondada. A instalação dessas soleiras ocorre em variados níveis crustais pouco profundos, e a configuração das sequências vulcânicas, assim como a dinâmica dos fluxos magmáticos no sistema alimentador, depende fortemente das características das rochas atravessadas — desde sedimentos estratificados e por vezes pouco consolidados até unidades metamórficas ou ígneas do embasamento.

O Modelo Geológico 3D elaborado, em conjunto com a expressão geofísica, revela uma coerência estrutural e espacial crucial para a compreensão da ascensão magmática na subsuperfície (Fig. 17). A análise integrada demonstrou que o posicionamento dos três corpos intrusivos (Soleiras A, B e C) é sistematicamente controlado por estruturas pré-existentes, além de outros agrupamentos de soleiras ao se extrapolar a área de modelagem, que seguem o mesmo padrão de correlação. Especificamente, a orientação dos paleovales, correlacionada aos paleolineamentos regionais NW-SE, manifesta uma coincidência precisa com as anomalias magnéticas de alto valor.

Essa convergência de dados multiescala sugere que as antigas descontinuidades crustais (os paleolineamentos) atuaram como condutos preferenciais ou zonas de falhas, guiando o magma verticalmente em subsuperfície até o contato com a Bacia do Paraná, gerando e alimentando o complexo de soleiras na área do estudo. Adicionalmente, o alinhamento preferencial NW-SE identificado nas soleiras corrobora o vetor de migração dos derrames magmáticos regionais previamente observado por Simões et al. (2022), reforçando a hipótese de um controle estrutural de longa duração na Depressão Central, além de revelar o potencial da modelagem superficial 3D do embasamento cristalino, como um método investigativo

promissor para localização de soleiras associadas a paleolineamentos soterrados pela Bacia do Paraná.

Figura 17 – Modelo esquemático de correlação dos paleolineamentos como fonte alimentadora das soleiras na área de estudo. A) Desenho esquemático do sistema intrusivo, aproveitando zonas de paleofalhas para ascender até a Bacia do Paraná, formando soleiras ao assumir um espalhamento mecânico horizontal em camadas de alta permeabilidade e porosidade. B) Localização soleira modelada e demais agrupamentos de furos que interceptam intervalos vulcânicos, na expressão geofísica. C) Posição das soleiras em relação com a superfície do embasamento, e suas paleoestruturas.



8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da modelagem geológica 3D permitiu sintetizar o comportamento do arcabouço estratigráfico na região a sudeste de cidade de Rio Pardo localizada na DCRS, além de realizar estimativas qualitativas e semi-quantitativas da geometria das soleiras, oferecendo uma visão integrada da disposição e das intrusões subvulcânicas e das unidades encaixantes.

A disparidade espacial entre esses conjuntos de dados impõe limites à definição precisa da extensão lateral e geometria, especialmente no caso das intrusões ígneas, que exibem formas irregulares e continuidade variável. Mesmo diante dessas restrições, o modelo obtido conseguiu delinear elementos relevantes da arquitetura intrusiva e identificar padrões de alojamento que não seriam perceptíveis em duas dimensões.

A identificação de zonas favoráveis ao alojamento de soleiras para armazenamento de CO₂, a partir da superfície modelada do embasamento cristalino e da interpretação de paleolineamentos, correlacionando a influência de sistemas alimentadores de soleiras por meio de diques associados a estrutural, exige uma abordagem integrada. Para testar essa hipótese, é necessário avançar com modelagens regionais adicionais, ampliar o conjunto de furos de sondagem disponíveis, aprofundar a revisão bibliográfica, buscar estudos análogos em outras províncias ígneas e na BP, expandindo a profundidade e técnicas de investigação geofísica indireta, a fim de garantir maior integração e resolução sobre a continuidade estrutural e a influência desses lineamentos nas intrusões magmáticas.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a abordagem adotada é capaz de direcionar investigações futuras sobre os fatores que controlam o posicionamento dos corpos ígneos. Adicionalmente, esta modelagem preliminar demonstra que o complexo de soleiras da DCRS serve de análogo para a caracterização de reservatórios em maior profundidade ou em bacias *offshore*. Essa compreensão mais consistente dos processos intrusivos permite reconhecer áreas com maior probabilidade de ocorrência de soleiras em subsuperfície, favorecendo a avaliação de seu potencial como reservatórios de CO₂ e auxiliando na definição de setores mais promissores em outras regiões da Bacia do Paraná, onde os métodos desenvolvidos para o objetivo deste trabalho possam ser aplicados.

9. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Luiza Lopes; MA, Julia Barbosa Curto; YOKOYAMA, Elder. Serra Geral Group plumbing system and 3D geological framework in Morungava region, ul-amer Paraná–Etendeka LIP (Brazil): Combining 3D geologic and magnetic models. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 132, p. 104660, 2023.

BACHU, S. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, v. 41, n. 9, p. 953-970. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00149-1).

BELLINI, Giuliano et al. Low-pressure ul-ameri of basalt sills from bore-holes in the Paraná Basin, Brazil. *Mineralogy and Petrology*, v. 33, n. 1, p. 25-47, 1984.

BITENCOURT, M.F., Nardi, L.V.S., 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Rev. Bras. Geociências* 30, 186–189.

BURCHARDT, Steffi. *Volcanic and Igneous Plumbing Systems: Understanding Magma Transport, Storage, and Evolution in the Earth's Crust*. Elsevier, 2018.

CARNEIRO, Patricia et al. Carbonatação do basalto e seu potencial uso no armazenamento de CO₂. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 10, n. 1, p. 43-49, 2013.

CARVALHO, P. F. (1932) Reconhecimento geológico no Estado do Rio Grande do Sul. *Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil*, v. 66, pp. 1-72.

CASE, George ND. Genesis of the E1 group of iron oxide-copper-gold deposits, Cloncurry district, North West Queensland. 2016. Tese de Doutorado. James Cook University.

CHEMALE JR., F. *Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense*. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2000.

COPERNICUS, acesso plugin Open Topography DEM no software QGIS® com base na World Geodetic System (1984).

COWAN, E. J.; Beatson, R. K.; Fright, W. R.; Mclennan, T. J.; Mitchell, T. J. Rapid geological modeling. In: Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining International Symposium. 2002, Kalgoorlie. Abstract Volume [...]. Kalgoorlie: Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 2002. p. 23-25

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Carvão do Rio Grande do Sul: relatório técnico. Rio de Janeiro: CPRM, 1980.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Projeto Aerogeofísico Escudo Sul-Rio-Grandense: relatório final. Rio de Janeiro: CPRM, 2010.

CRUDEN, A. R.; MCCAFFREY, K. J. W.; BUNGER, A. P. Geometric Scaling of Tabular Igneous Intrusions: Implications for and. In: BREITKREUZ, C.; ROCCHI, S. (ed.). Physical 132 Geology of Shallow Magmatic Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017. P.11–38.

DE OLIVEIRA, Saulo Batista; COSTA, João Felipe CL; CIOTTA, Mariana. Use of 3D modelling in the CO₂ geological storage, possible applications for Paraná and Santos Basins. Perspectives to CO₂ Geological Storage and Greenhouse Gas Negative Emissions in South-Southeastern Brazil: Paraná and Santos Sedimentary Basins, p. ca 6-130, 2022.

DE LIMA, Evandro Fernandes et al. Feeder systems of acidic lava flows from the Paraná-Etendeka Igneous Province in ul-amer Brazil and their implications for eruption style. Journal of South American Earth Sciences, v. 81, p. 1-9, 2018.

DE TONI, G. B. et al. Anatomy of the transpressional Dom Feliciano Belt and its precollisional isotopic (Sr–Nd) signatures: A contribution towards an integrated model for the Brasiliano/Pan-African orogenic cycle. Gondwana Research, v. 125, p. 180–209, 2024.

FRANK, Heinrich Theodor; GOMES, Márcia Elisa Boscato; FORMOSO, Milton Luiz Laquintinie. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. Pesquisas em Geociências, v. 36, n. 1, p. 49-57, 2009.

GALLAND, O. et al. Storage and ul-american magma in the layered crust—Formation of sills and related flat-lying intrusions. In: Volcanic and igneous plumbing systems. Elsevier, 2018. P. 113-138.

GALLAND, Olivier et al. Structure, emplacement mechanism and magma-flow significance of igneous fingers—Implications for sill emplacement in ul-american basins. *Journal of Structural Geology*, v. 124, p. 120-135, 2019.

GÍSLASON, Sigurdur R. et al. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase. *Energy Procedia*, v. 146, p. 103-114, 2018.

GOLDBERG, David S.; TAKAHASHI, Taro; SLAGLE, Angela L. Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 105, n. 29, p. 9920-9925, 2008.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR, Farid; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no pré-cambriano. *Iannuzzi, R. Frantz JC.(Org.)*, v. 50, p.97-123, 2007.

HARTMANN, Leo A.; LOPES, William R.; SAVIAN, Jairo F. Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, p. 75-92, 2016.

HEILBRON, Mônica et al. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U–Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research*, v. 178, n. 1-4, p. 136-148, 2010.

HEPPLE, R. P.; BENSON, S. M. Geologic storage of ul-ame dioxide as a climate change mitigation strategy: performance requirements and the implications of surface seepage. *Environmental Geology*, v. 47, p. 576-585, 2005.

HOLZ, Michael et al. Hierarchy of tectonic sul-american stratigraphic signatures: base-level changes during the Early Permian in the Paraná Basin, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 22, n. 3-4, p. 185-204, 2006.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary Technical – AR6. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf.

Acesso em: 03 set. 2024

IPCC, 2005. Special ul-ameri Carbon Dioxide Capture and Storage Metz, B.; Davidson, O.; Coninck, H.C. de; Loos, M.; Meyer, L. 2005, Book (monograph).

JERRAM, Dougal A.; BRYAN, Scott E. Plumbing systems of shallow level intrusive complexes. *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems: Dykes, Sills and Laccoliths*, p. 39-60, 2015.

KETZER, Joao Marcelo et al. Brazilian atlas of CO2 capture and geological storage. 2015.

LEE, Hoesung et al. IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, h. Lee and j. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023.

MAGEE, Craig et al. Lateral magma flow in mafic sill complexes. *Geosphere*, v. 12, n. 3, p. 809-841, 2016.

MAGEE, Craig et al. Structure and dynamics of surface uplift induced by incremental sill emplacement. **Geology**, v. 45, n. 5, p. 431-434, 2017.

MAGEE, Craig et al. Structural signatures of igneous sheet intrusion propagation. *Journal of Structural Geology*, v. 125, p. 148-154, 2019.

MATTER, Juerg M. et al. Permanent ul-ame dioxide storage into basalt: the CarbFix pilot ul-ame, Iceland. *Energy Procedia*, v. 1, n. 1, p. 3641-3646, 2009.

MATTER, Juerg M. et al. Rapid ul-ame mineralization for ul-ameri disposal of anthropogenic ul-ame dioxide emissions. *Science*, v. 352, n. 6291, p. 1312-1314, 2016.

MCGRAIL, B. P. et al. The Wallula basalt sequestration pilot project. *Energy Procedia*, v. 4, p. 5653-5660, 2011.

MELFI, A.J, Nardy, A.J.R, Piccirillo, E.M., 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin: An introduction. In: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (Eds.), The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Porto Alegre, 225p. 1997. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geociências)-Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MILANI, Edison José et al. Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. Boletim de Geociencias da PETROBRAS, v. 15, n. 2, p. 183-205, 2007.

MOTTIN, THAMMY ELLIN; VESELY, FERNANDO FARIAS. Formação Taciba: última manifestação glacial no Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, v. 78, p. 65-82, 2021.

MUSARRA, Raíssa Moreira Lima Mendes; TASSINARI, Colombo Celso Gaeta; CAÑAS, Stephanie San Martín. PERSPECTIVES TO CO2 GEOLOGICAL STORAGE AND GREENHOUSE GAS NEGATIVE EMISSIONS IN SOUTH-SOUTHEASTERN BRAZIL, 2022.

NAÇÕES UNIDAS. Acordo de Paris. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), Paris, 2016. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 17 set. 2024

PEATE, David W.; HAWKESWORTH, Chris J.; MANTOVANI, Marta SM. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. Bulletin of Volcanology, v. 55, p. 119-139, 1992.

PESSANO, Pedro C. et al. Updated map of the mafic dike swarms of Brazil based on airborne geophysical data. Journal of South American Earth Sciences, v. 107, p. 103076, 2021.

PELISSARI, Maria Rogieri. Avaliação de reservatórios potenciais para armazenamento geológico de CO₂ emitido pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Santa Catarina. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PELISSARI, Maria Rogieri et al. Parana Sedimentary Basin's potential for CO₂ geological storage. In: Perspectives to CO₂ Geological Storage and Greenhouse Gas Negative Emissions in South-Southeastern Brazil: Paraná and Santos Sedimentary Basins: Paraná and Santos Sedimentary Basins. Blucher Open Access, 2022. p. 41-60.

PHILIPP, Ruy Paulo et al. O magmatismo granítico neoproterozóico da batólito Pelota no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. Anais, p. 465, 2002.

PHILIPP, R.P.; Machado, R. (2002) Ocorrência e significado dos septos do embasamento encontrados nas suítes graníticas do Batólito Pelotas, RS, Brasil. Pesquisas em Geociências, v. 29 (1), pp. 43-60.

PICADA, R. S.; VILLWOCK, J. A.; HABECOST, C. Olivina-diabásio de Lomba Grande, Novo Hamburgo, RS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 24, 1970, Brasília. Sociedade Brasileira de Geologia, 1970, p. 345-356, v. 1.

PINTO, Viter Magalhães et al. Chemistry of chromium spinel in high-Mg rocks from the Morungava Intrusion, Cretaceous Paraná Igneous Province, southernmost Brazil. Mineralogy and Petrology, v. 113, p. 765-782, 2019.

PLANKE, Sverre et al. Seismic characteristics and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. In: Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series. The Geological Society of London, 2005. p. 833-844.

POLO, Liza; JANASI, Valdecir de Assis. Vulcano-estratigrafia das rochas intermediárias a ácidas ao sul da Província Magmática Paraná, Brasil. Geologia USP. Série Científica, v. 14, n. 2, p. 83-100, 2014.

POLTEAU, Stéphane et al. Saucer-shaped intrusions: Occurrences, emplacement and implications. Earth and Planetary Science Letters, v. 266, n. 1-2, p. 195-204, 2008.

RAZA, Arshad et al. Carbon mineralization and geological storage of CO₂ in basalt: Mechanisms and technical challenges. *Earth-Science Reviews*, v. 229, p. 104036, 2022.

RENNER, Leonardo Cardoso. Geoquímica de sills basálticos da Formação Serra Geral, sul do Brasil, com base em rocha total e micro-análise de minerais. 2010.

ROCKETT, Gabriela Camboim et al. The CARBMAP project: Matching CO₂ sources and geological sinks in Brazil using geographic information system. *Energy Procedia*, v. 4, p. 2764-2771, 2011.

ROSSETTI, Lucas et al. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 98-114, 2018.

ROSSETTI, Lucas de Magalhães May et al. Estratigrafia do grupo Serra Geral na Calha de Torres, sul do Brasil. *Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2021. p. 321-336, 2021a.

ROSSETTI, Lucas MM et al. Magmatic evolution of Low-Ti lavas in the southern Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Lithos*, v. 400, p. 106359, 2021b.

SANTOS NETO, E. V. Caracterização geoquímica e paleoambiente deposicional da seqüência carbonato-pelítica superior do Membro Assistência, Formação Irati no Estado de São Paulo, Bacia do Paraná. 1993. 203 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

SARMENTO, Carla Cecília Treib et al. Corpos hipabissais correlacionados à Formação Serra Geral na região do Cerro do Coronel, RS: geologia e petrologia. *Geologia USP. Série Científica*, v. 14, n. 2, p. 23-44, 2014.

SEEG - (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa). 2018. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris 1970-2016, p. 51.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2019. Relatório Síntese, 2019. 33p. Acesso em 24/03/2020. <https://seegbr.s3.amazonaws.com/2019-v7.0/documentos-analiticos/SEEG-Relatorio-Analitico-2019.pdf>

SEEQUENT LIMITED. *Leapfrog Geo User Manual*. Version 5.0. Christchurch, New Zealand: Seequent, 2019

SIMÕES, Matheus Silva et al. Petrogenesis of low-Ti dolerite sills from Paraná-Etendeka LIP in Cerro do Coronel region, southernmost Brazil. *International Geology Review*, v. 65, n. 10, p. 1745-1764, 2022.

SIMÕES, Matheus S. et al. Silicic lavas with no basal breccia: origin of the thinly jointed basal facies of low-Ti dacites in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Bulletin of Volcanology*, v. 85, n. 3, p. 16, 2023.

SALOMON, Eric; PASSCHIER, Cees; KOEHN, Daniel. Asymmetric continental deformation during South Atlantic rifting along southern Brazil and Namibia. *Gondwana Research*, v. 51, p. 170-176, 2017.

SNÆBJÖRNSDÓTTIR, Sandra Ó. et al. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 2, p. 90-102, 2020.

SOUZA, Igor Viegas Alves Fernandes de. Avaliação do efeito térmico das intrusivas ígneas em um horizonte potencialmente gerador da Bacia do Paraná: Formação Irati. 2004.

STEWART, M. et al. Grade estimation from radial basis functions—how does it compare with conventional geostatistical estimation. In: Ninth International Mining Geology Conference, Adelaide, Australia. 2014. p. 139.

VIERO, A. P.; ROISENBERG, A.; MAGRO, F. H. S. Gravimetria de Um Corpo Hipabissal Básico da Formação Serra Geral em Lomba Grande, RS. *Pesquisas em Geociências*, v. 18, n. 2, p. 156-160, 1991.

VIERO, A. P.; ROISENBERG, A. Petrologia e geoquímica do Complexo Básico de Lomba Grande, RS. *Pesquisas em Geociências*, v. 19, n. 1, p. 41-54, 1992.

WARREN, Lucas Verissimo et al. Sedimentary evolution of Rio do Rastro formation (permian-triassic of the Parana Basin) at central south portion of Santa Catarina State, Brazil; Evolucao sedimentar da Formacao Rio do Rastro (Permo-Triassico da Bacia do Parana) na porcao centro sul do estado de Santa Catarina, Brasil. Revista Brasileira de Geociencias, v. 38, 2008.

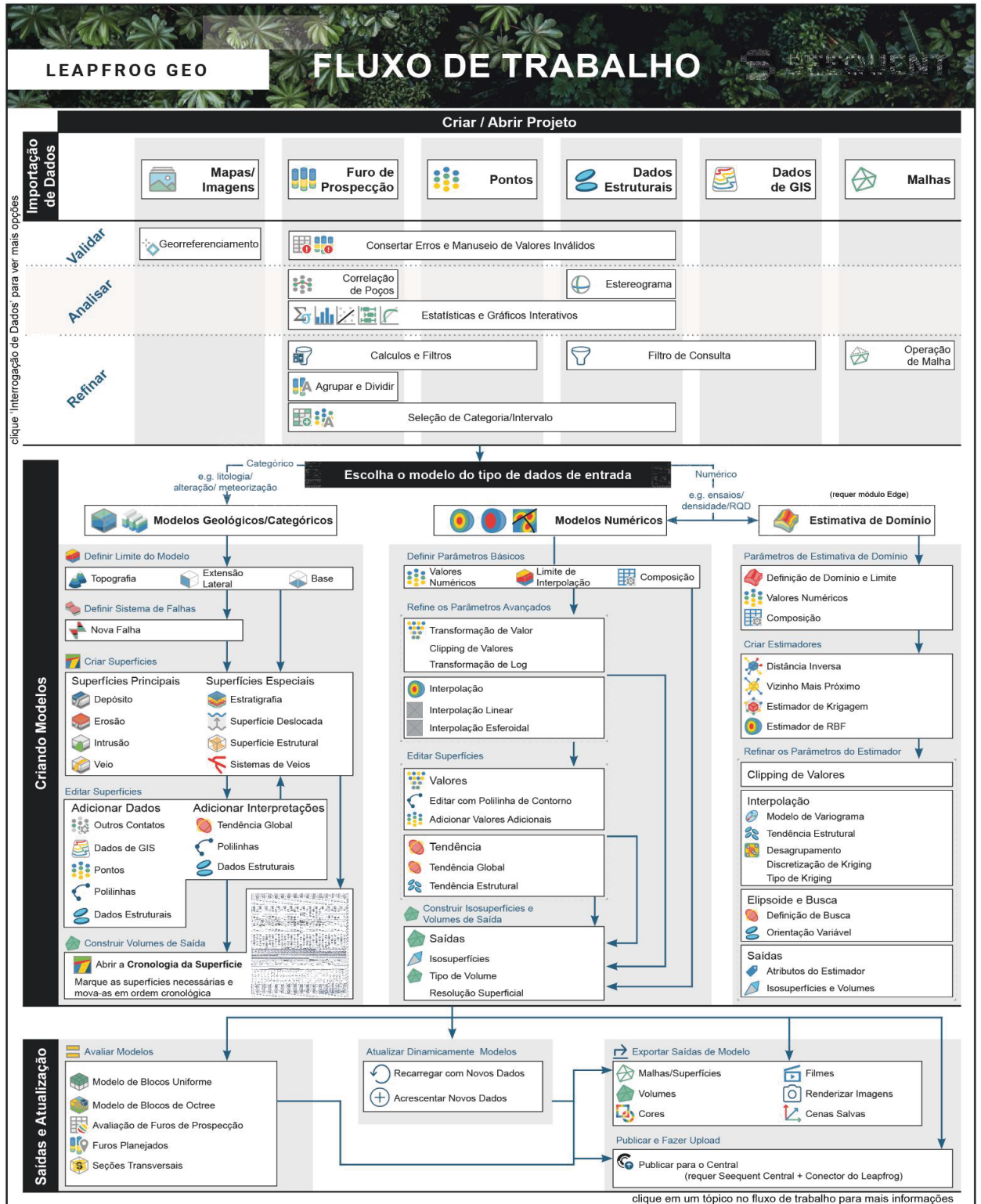
ZALÁN, P. V. et al. Estilos estruturais relacionados a intrusões magmáticas básicas em rochas sedimentares. Boletim Técnico da Petrobrás, n. 4, p. 221-230, 1985.

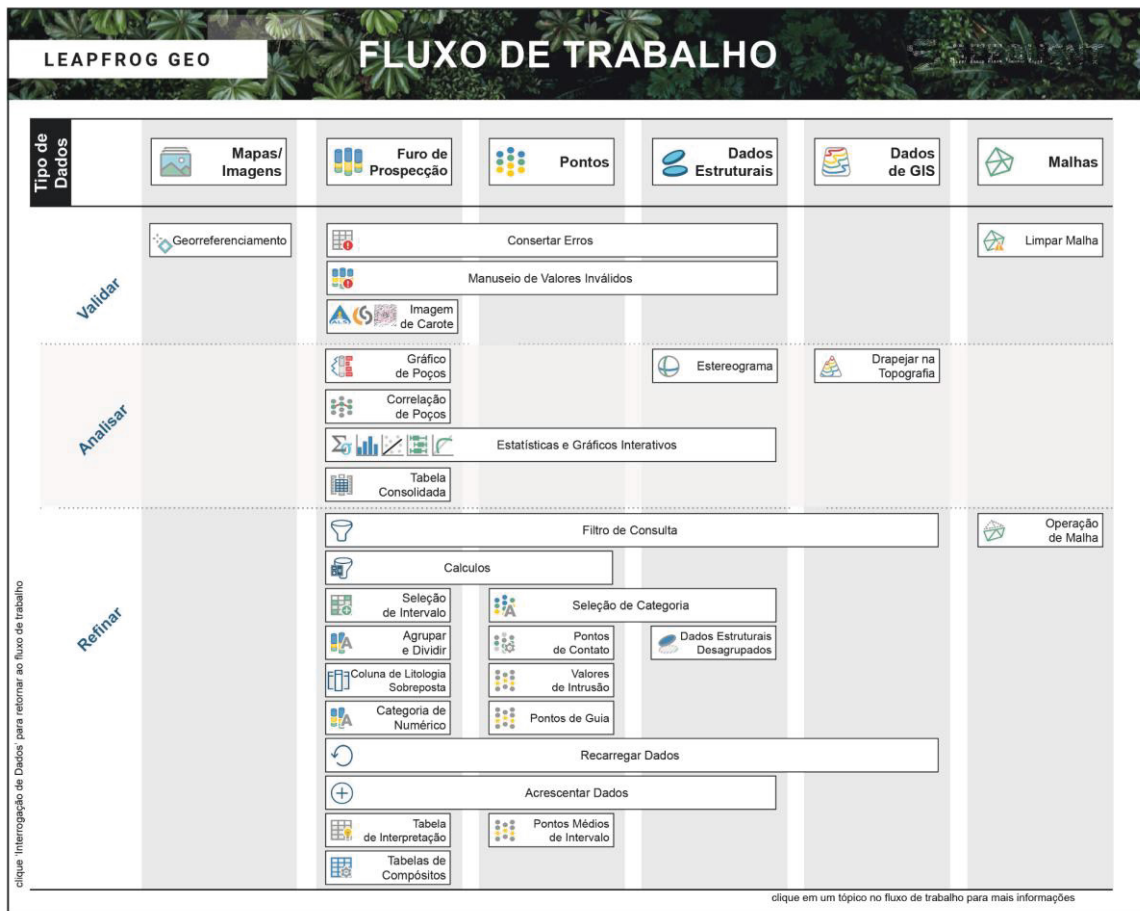
ZALÁN, P. et al. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná: Simpósio SulBrasileiro de Geologia, 1. Curitiba, PR, Brazil, Available at: [Access on: April](#), v. 14, p. 2022, 1987.

ZAKHAROVA, N. V. et al. Reservoir and sealing properties of the Newark rift basin formations: Implications for carbon sequestration. The Leading Edge, v. 39, n. 1, p. 38-46, 2020.

10. APÊNDICES

A - Fluxo de Trabalho Leapfrog Geo®





B - Tabela furos de sondagem polígono de estudo.

Furos de sondagem							
Hole_ID	x	y	z	depth	From	To	Intervalos
CA-007-RS	377942	6676998	28,4	366,7	228,6	233,1	Gr. Serra Geral
CA-037-RS	369942	6669998	49,6	291,2	136	145,5	Gr. Serra Geral
CA-050-RS	377942	6671998	21,4	179,9			
CA-052-RS	377872	6680968	32,9	424,7	253,5	262,1	Gr. Serra Geral
CA-053-RS	381942	6676998	59,3	638,9	279,5	282,3	Gr. Serra Geral
					300	308,8	Gr. Serra Geral
CA-055-RS	381943	6682998	42,1	290,2			
CA-056-RS	374632	6676418	61,5	490,3	301,2	305,2	Gr. Serra Geral
IB-032-RS	383823	6676998	26,6	352,1	170	182	Gr. Serra Geral
					182,5	184	Gr. Serra Geral
					252	262	Gr. Serra Geral
IB-033-RS	379934	6676998	68,9	430,7	250,4	257,5	Gr. Serra Geral
IB-034-RS	381942	6674998	57,6	391	107,5	112,9	Gr. Serra Geral
IB-035-RS	383942	6678998	17,4	286,1			
IB-041-RS	375975	6678970	15,6	353,2	199	210,6	Gr. Serra Geral
IB-043-RS	380988	6678996	16,9	315,8	172,2	178	Gr. Serra Geral
IB-049-RS	371895	6673933	63,4	347,2			

IB-050-RS	372022	6680044	48,9	481,8	279,5	289	Gr. Serra Geral
IB-052-RS	374693	6684408	15,4	410,7			
IB-053-RS	369743	6684548	36,5	520,7			
IB-054-RS	373952	6669948	69,8	219,9			
IB-131-RS	384942	6670998	73,3	351,9			
IB-148-RS	383944	6670020	91	351,8			
LA-001-RS	373945	6681974	25,7	403			
LA-003-RS	373942	6679998	16,4	359,6	188,8	189,59	Gr. Serra Geral
					190,99	191,2	Gr. Serra Geral
					211,2	215,91	Gr. Serra Geral
LA-004-RS	373942	6678998	16,3	384,7			
LA-005-RS	373943	6677998	32,3	481,5			
LA-006-RS	374986	6675956	58,7	488	282,5	284	Gr. Serra Geral
LA-007-RS	374019	6675964	60,4	493	289,74	292,03	Gr. Serra Geral
LA-008-RS	374122	6674924	63,7	410,1			
LA-010-RS	374948	6680989	12,2	353	201	205	Gr. Serra Geral
					205	207	Gr. Serra Geral
					207	210,78	Gr. Serra Geral
LA-011-RS	374942	6679998	7,8	356,9	188,33	189	Gr. Serra Geral
					189	198,75	Gr. Serra Geral
LA-012-RS	374942	6678998	13,5	359,3	208,3	218,28	Gr. Serra Geral
LA-013-RS	374992	6677956	21,3	382	201,7	203,44	Gr. Serra Geral
					207,4	211,8	Gr. Serra Geral
LA-014-RS	374991	6676953	34	376,4	222	225,9	Gr. Serra Geral
LA-015-RS	375077	6674980	33,4	395,2			
LA-016-RS	376038	6681980	10,3	348			
LA-017-RS	375903	6681035	27,9	336			
LA-018-RS	376051	6679667	20,2	329,8			
LA-019-RS	375943	6677998	13,3	417,3	204	211,5	Gr. Serra Geral
LA-020-RS	375866	6676947	26,2	381,2			
LA-021-RS	375943	6675966	19,9	473,9			
LA-027-RS	377019	6677714	17	383,3			
LA-028-RS	377055	6676718	14,8	428			
LA-029-RS	377119	6675704	24,8	390	210	212,5	Gr. Serra Geral
LA-030-RS	377121	6674719	31,4	307,1			
LA-031-RS	377943	6682004	51,8	434,3			
LA-032-RS	377965	6679741	46,2	368,7			
LA-033-RS	377993	6678954	38,5	427,3			
LA-034-RS	378016	6677748	28,6	426,1			
LA-035-RS	378011	6675990	27,4	346,6	179,69	191,9	Gr. Serra Geral
LA-036-RS	378116	6674757	44,6	269,8			
LA-039-RS	378942	6679998	23,1	385			
LA-040-RS	378942	6678798	47,6	388,1			
LA-041-RS	379032	6677780	70,3	474	270	271	Gr. Serra Geral
					271	283,25	Gr. Serra Geral

LA-042-RS	379048	6676721	77,2	468,2			
LA-043-RS	379080	6675778	62	348,6	194,42	195,73	Gr. Serra Geral
LA-044-RS	378932	6674996	53,6	299,1			
LA-045-RS	380029	6677873	41,9	411	240,4	242,5	Gr. Serra Geral
					247,45	255,5	Gr. Serra Geral
LA-046-RS	380085	6675810	81	373			
LA-047-RS	380127	6674837	36,1	298,2			
LA-048-RS	381024	6677823	34,7	421	223,7	231,8	Gr. Serra Geral
LA-049-RS	381052	6676839	70,5	391,5			
LA-050-RS	381056	6675824	70,6	351,4			
LA-051-RS	381115	6674844	58,9	316,6			
LA-052-RS	382022	6677869	34,8	398,9			
LA-053-RS	382121	6675812	51,7	485	260	270,9	Gr. Serra Geral
LA-054-RS	382843	6677900	14,8	347			
LA-055-RS	383142	6676908	20,4	461,8			
LA-056-RS	383215	6675760	22,3	580,1			
LA-057-RS	383120	6674927	22,3	495,4			
LA-058-RS	383945	6677932	21,9	349,5	308,75	309,15	Gr. Serra Geral
LA-059-RS	384025	6675865	34,6	497,6			
LA-060-RS	383983	6674905	67,5	504,5			
LA-061-RS	382035	6679798	20,9	198,7			
LA-062-RS	379943	6680056	12,9	350,2	203,64	210,82	Gr. Serra Geral
LA-063-RS	382942	6672998	72,2	400			
LA-064-RS	380942	6672998	78,8	295			
LA-065-RS	378942	6672998	53,1	263,6			
LA-066-RS	376942	6672998	17,7	271,3			
LA-067-RS	377942	6673998	19,5	239,5			
LA-068-RS	379942	6673998	40	257,5			
LA-069-RS	381942	6673998	69,3	388,1			
LA-070-RS	379911	6679005	20,9	368,1	203,5	210,15	Gr. Serra Geral
LA-071-RS	381903	6678998	24	252	154,64	162	Gr. Serra Geral
LA-072-RS	376134	6674153	18,4	310,5			
LA-073-RS	378932	6673998	33,7	256,8			
LA-074-RS	380942	6673998	66,4	315,2			
LA-075-RS	383062	6673998	37,3	402			
LA-076-RS	372942	6676998	41,9	506,7	306,05	310,2	Gr. Serra Geral
LA-077-RS	372942	6679017	18,2	361,6	214,05	220,35	Gr. Serra Geral
LA-078-RS	378948	6680998	31,7	384,2	239,55	245,35	Gr. Serra Geral
LA-079-RS	376895	6682895	12,4	393			
LA-080-RS	371927	6682974	22,7	449,2			
LA-081-RS	371942	6677999	27,5	512	303	308	Gr. Serra Geral
LA-082-RS	371942	6675998	31,8	500	270,9	273,9	Gr. Serra Geral
LO-001-RS	384742	6672848	72	314,8	105,5	116,9	Gr. Serra Geral
LO-002-RS	384742	6674248	78,3	473,5	258,3	267,8	Gr. Serra Geral
					464,65	468,28	Gr. Serra Geral

LO-009-RS	385562	6677048	67,1	367,4	302	305,18	Gr. Serra Geral
-----------	--------	---------	------	-------	-----	--------	-----------------